



**Gonçalo Silva Vieira**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Conceção de um sistema para  
acoplamento de balões a uma  
plataforma aérea ancorada e  
estrutura para auxiliar os processos  
de descolagem e aterragem**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor António Gabriel Marques  
Duarte dos Santos, Professor Auxiliar,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia –  
Universidade Nova de Lisboa

Coorientador: Engenheiro Pedro Miguel Marques dos  
Santos Silva, Omnidea, Lda – Aerospace  
Technology and Energy Systems

Júri:

Presidente: Professor Doutor Rui Fernando dos Santos  
Pereira Martins

Arguente: Professor Doutor João Manuel Vicente Fradinho

Vogal: Professor Doutor António Gabriel Marques  
Duarte dos Santos



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro 2018**



# **Gonçalo Silva Vieira**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Conceção de um sistema para acoplamento de balões a uma plataforma aérea ancorada e estrutura para auxiliar os processos de descolagem e aterragem**

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador:

Professor Doutor António Gabriel Marques Duarte dos Santos, Professor Auxiliar Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa

Coorientador:

Engenheiro Pedro Miguel Marques dos Santos Silva,  
Omnidea, Lda – Aerospace Technology and Energy Systems

Júri:

Presidente: Professor Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins

Arguente: Professor Doutor João Manuel Vicente Fradinho

Vogal: Professor Doutor António Gabriel Marques Duarte dos Santos

Setembro 2018





**Conceção de um sistema para acoplamento de balões a uma plataforma aérea ancorada e estrutura para auxiliar os processos de descolagem e aterragem**

Copyright © Gonçalo Silva Vieira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## Agradecimentos

Quero agradecer, em primeiro lugar, ao meu orientador Professor Doutor António Gabriel Santos pela sua disponibilidade, acompanhamento, ajuda e críticas construtivas e sugestões ao longo da realização da presente dissertação.

A toda a equipa da empresa *Omnidea* pela oportunidade que me ofereceu em poder realizar a tese no âmbito de um dos seus projetos. Quero deixar um especial agradecimento ao Engenheiro Pedro Silva pela sua contribuição e recomendações ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa pelo acompanhamento e formação ao longo do meu percurso académico.

Um agradecimento muito especial à minha família, em especial aos meus pais e irmão, por acreditarem em mim, me apoiarem e me transmitirem importantes valores que tornaram possível a realização desta dissertação e conclusão do curso.

A todos os meus colegas de curso e em especial aos meus grandes amigos Henrique Barata, Tiago Rodrigues e Rui Santos por todo o companheirismo, diversão e momentos proporcionados ao longo do meu percurso académico.

Um especial obrigado à Joana Raminhos por todo o apoio, suporte, carinho e força ao longo desta etapa da minha vida.



## Resumo

A presente dissertação tem como objetivo a concepção de um sistema que torne possível o acoplamento de vários balões aos cabos principais de uma plataforma ancorada mais leve que o ar e o projeto e desenvolvimento de uma estrutura auxiliar para facilitar os processos de descolagem e aterragem dos balões.

Inserida no projeto *Long Endurance Medium Altitude Platform* (LEMAP) da empresa *Omnidea*, surge a ideia de acoplar diversos balões ao sistema atual da empresa, aumentando assim a força aerodinâmica resultante, permitindo ao conjunto atingir altitudes mais elevadas e carregar uma maior carga útil. Para cumprir este objetivo é necessário o desenvolvimento de um sistema de acoplamento dos balões à plataforma. No que toca à estrutura auxiliar, o objetivo é que esta sirva para qualquer tipo de balão, que seja móvel e que permita a rotação dos balões com estes já assentes nas suas bases.

Inicialmente são apresentados os vários componentes do sistema atual da empresa, assim como todos os procedimentos executados nos processos de descolagem e aterragem da plataforma atual. O objetivo passa pela sensibilização para os procedimentos, de modo a simplificar a sua adaptação para o caso de uma plataforma constituída por múltiplos balões.

Após a seleção da melhor solução para os processos de descolagem e aterragem de uma plataforma constituída por múltiplos balões, considerando os valores das forças que atuam nos balões e em todo o sistema, são escolhidos novos guinchos auxiliares, projetados todos os componentes que formam os três sistemas, distintos, de acoplamento dos balões à plataforma e desenvolvida a estrutura auxiliar para os processos de descolagem e aterragem. De modo a validar a resistência de todos os componentes projetados, foram realizadas simulações numéricas que garantem que os sistemas suportam os esforços a que são sujeitos quando a plataforma está em operação ou na aterragem dos balões.

**Palavras-chave:** Aterragem; Descolagem; Estrutura auxiliar; Múltiplos balões; Plataforma aérea; Sistema de acoplamento.



## Abstract

The objective of the present dissertation is to design a system that allows the coupling of multiple balloons to the main cables of an anchored lighter-than-air platform, and the project and development of an auxiliary structure used to facilitate the landing and take-off process of the balloons.

Inserted in *Omnidea's Long Endurance Medium Altitude Platform* (LEMAP) project, arises the idea of coupling several balloons to the company's current system, this way increasing the aerodynamic force of the system, allowing the set to achieve higher altitudes and carry a larger and heavier payload. To fulfill this objective, it is necessary to develop a system that allows the coupling of the balloons to the platform. Regarding the auxiliary structure, the objective is that it can be used with any kind of balloon, it can be mobile, and it allows the balloons to rotate with them already rested in their bases.

Initially the various components of the company's present system are introduced as well as all the procedures taken in the take-off and landing processes of the current platform. The objective is to raise awareness to the actual processes so that their adaptation to a case of a platform consisting of multiple balloons becomes easier.

After selecting the best solution for the take-off and landing processes of a platform consisting for multiple balloons, through the values of the forces that act in the balloons and in the entire system, new auxiliary winches are selected. All the components that form the three, distinct, systems for coupling the balloons to the platform and the auxiliary structure of the take-off and landing process are also developed. In order to validate the resistance of all the designed components, numerical simulations are made to make sure that the systems support all the stresses that they are subjected to when the platform is in operation or in the impact of the balloons landing.

**Keywords:** Aerial platform; Auxiliary structure; Coupling system; Landing; Multiple balloons; Take-off.





# Índice de Conteúdos

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Motivação.....	6
1.3 Objetivos .....	6
1.4 Estrutura da dissertação .....	7
<b>2. Sistema e tecnologia utilizados.....</b>	<b>9</b>
2.1 Componentes.....	9
2.1.1 Plataforma área.....	9
2.1.2 Motores .....	10
2.1.3 Guincho principal e guinchos auxiliares.....	10
2.1.4 Tipos de cabos.....	12
2.2 Etapas dos processos de descolagem e aterragem atuais.....	15
2.2.1 Fase de descolagem.....	15
2.2.2 Fase de aterragem.....	16
2.3 Tecnologias semelhantes .....	17
<b>3. Considerações e abordagem inicial do problema .....</b>	<b>25</b>
3.1 Considerações iniciais e fatores importantes para os processos de aterragem e descolagem.....	25
3.2 Balão do topo <i>Versus</i> restantes balões .....	28
<b>4. Soluções propostas e comparações.....</b>	<b>31</b>
4.1 Hipótese 1: Dois guinchos principais e cabos principais paralelos .....	34
4.2 Hipótese 2: Plataforma tratada como uma só com descolagem e aterragem simultânea de balões .....	37
4.3 Hipótese 3: Acoplamento e desacoplamento individual dos balões recorrendo a uma estrutura auxiliar .....	39
4.4 Comparação das várias hipóteses .....	42
<b>5. Cálculo das forças aerodinâmicas e seleção de novos guinchos auxiliares .....</b>	<b>45</b>
5.1 Força de arrasto e força de sustentação .....	45
5.2 Ângulo de equilíbrio em relação à horizontal.....	52
5.3 Forças a realizar pelos guinchos auxiliares e escolha de novos guinchos .....	58
5.3.1 Cálculo da força que cada guincho auxiliar realiza .....	58
5.3.2 Escolha de novos guinchos auxiliares .....	62
<b>6. Sistemas de ligação e acoplamento dos balões à plataforma .....</b>	<b>69</b>
6.1 Bloco .....	70
6.1.1 Bloco para balão secundário com rotação imposta.....	72
6.1.2 Bloco para balão secundário sem rotação imposta .....	74
6.2 Bumeranges.....	75
6.3 Peças de ligação e <i>cable grip</i> .....	77
6.3.1 Peças de ligação dos cabos principais aos blocos.....	77

6.3.2 Escolha do <i>cable grip</i> .....	82
6.4 Dimensionamento de ligações e escolha de casquilho .....	85
6.4.1 Determinação das forças que atuam no sistema .....	85
6.4.2 Ligações aparafusadas .....	88
6.4.3 Ligação com cavilha.....	91
6.4.4 Escolha do casquilho .....	95
6.5 Simulações numéricas.....	96
6.5.1 Balão principal.....	97
6.5.2 Balão secundário com rotação imposta .....	100
6.5.3 Balão secundário sem rotação imposta .....	104
<b>7. Projeto da estrutura auxiliar .....</b>	<b>107</b>
7.1 Tipo de perfil e material da estrutura .....	108
7.2 Dimensionamento do subsistema em forma de torre .....	110
7.2.1 Base do subsistema.....	110
7.2.2 Estrutura do subsistema .....	111
7.2.3 Base em forma de berço e rolos .....	113
7.2.4 Rodas de transporte.....	118
7.2.5 Cintas de amarração.....	121
7.3 Dimensionamento do subsistema de ligação .....	124
7.3.1 Estrutura do subsistema de ligação .....	124
7.3.2 Montagem do subsistema de ligação ao subsistema em forma de torre .....	125
7.4 Posicionamento ideal da estrutura no local de aterragem .....	127
7.5 Simulações Numéricas .....	130
7.5.1 Cálculo da força de embate dos balões.....	130
7.5.2 Resultados das simulações numéricas.....	135
<b>8. Conclusões e trabalhos futuros .....</b>	<b>141</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>145</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>149</b>
Anexo A .....	150
Anexo B .....	158
Anexo C .....	160
Anexo D .....	163
Anexo E .....	164
Anexo F .....	165
Anexo G .....	166
Anexo H .....	168
Anexo I.....	170
Anexo J .....	171
Anexo K .....	225

## Índices de Figuras

Figura 1.1: Balão principal da plataforma mais leve que o ar.....	2
Figura 1.2: Força aerodinâmica criada pelo efeito de Magnus.....	3
Figura 1.3: Gráfico dos coeficientes de arrasto e sustentação teóricos e experimentais para um cilindro em rotação em função da razão de velocidades).....	4
Figura 1.4: Plataforma aérea constituída por dois balões .....	5
Figura 1.5: Fluxograma da estrutura da dissertação. ....	8
Figura 2.1: Plataforma aérea e sua constituição; (a) Plataforma composta por dois balões; (b) Constituição das várias camadas.....	10
Figura 2.2: Componentes utilizados no sistema da empresa; (a) Sheave; (b) Guincho principal. ....	11
Figura 2.3: Guincho CP-500T do fabricante COMEUP.....	11
Figura 2.4: Cabo Dynex da empresa Hampidjan .....	12
Figura 2.5: Cabo Dyneema da empresa Lankhorst. ....	13
Figura 2.6: Relação entre peso e carga suportada para um cabo de Dyneema, Poliéster e de aço.....	13
Figura 2.7: Comparação da resistência à fratura por fadiga entre um cabo de Dyneema, Poliéster e de aço.....	14
Figura 2.8: Disposição dos vários cabos no processo de descolagem. ....	16
Figura 2.9: Aeróstato 420K da empresa Lockheed Martin. ....	18
Figura 2.10: Planador M600 da Makani Power.....	19
Figura 2.11: Planador da empresa Kitemill. ....	19
Figura 2.12: Esquema do voo em espiral do planador durante a fase de produção de energia.....	20
Figura 2.13: Plataforma aérea da Altaeros Energies. ....	20
Figura 2.14: Sistema de cabos e guinchos utilizado pela empresa Altaeros Energies (cabos auxiliares a azul e cabo principal a preto). ....	21
Figura 2.15: Plataforma aérea do projeto MARS.....	22
Figura 2.16: Estrutura de aterragem e descolagem da empresa Helikite. ....	23
Figura 3.1: Plataforma com rolos da empresa LJ Welding Automation.....	27
Figura 3.2: Componentes do sistema de rotação do atual balão principal. ....	29
Figura 4.1: Ligação dos vários pares de cabos principais da plataforma e detalhe do caso de um balão secundário sem rotação imposta. ....	32
Figura 4.2: Exemplo de uma das peças de ligação onde são fixos os cabos principais através de manilhas. ....	32
Figura 4.3: Componentes inicialmente propostos a utilizar; (a) Cable gland; (b) Cord grip com rede de aço inoxidável. ....	33
Figura 4.4: Esquema do processo de aterragem levado na hipótese 1. ....	34
Figura 4.5: Problemas associados ao desacoplamento dos balões da plataforma; (a) Fecho dos cabos (vista de frente); (b) Subida dos cabos (vista lateral). ....	35

Figura 4.6: Solução para garantir a continuidade dos cabos principais; (a) Representação do cabo auxiliar adicional; (b) Modo como este se dispõe no sistema. ....	35
Figura 4.7: Esquema do processo de aterragem levado na hipótese 2. ....	38
Figura 5.1: Gráfico que relaciona o coeficiente de arrasto, $C_d$ , com o número de Reynolds, $Re$ , de uma esfera e um cilindro lisos. ....	47
Figura 5.2: Gráfico comparativo das forças de arrasto para os dois tipos de balões quando estes não têm rotação imposta. ....	48
Figura 5.3: Diagrama de forças que atuam nos dois tipos de balões; (a) Balão principal; (b) Balão secundário com rotação. ....	53
Figura 5.4: Diagrama de forças que atuam nos vários balões que constituem a plataforma durante o processo de descolagem e aterragem. ....	55
Figura 5.5: Força resultante realizada por cada guincho auxiliar e respetivas componentes na direção de cada eixo. ....	58
Figura 5.6: Diagrama de forças que atuam nos balões que constituem a plataforma, no plano XY, quando estes são recolhidos. ....	60
Figura 5.7: Diagrama de forças que atuam nos balões que constituem a plataforma, no plano YZ, quando estes são recolhidos. ....	61
Figura 5.8: Guincho CWG-30375 do fabricante COMEUP. ....	63
Figura 5.9: Dimensões do guincho CWG-30375. ....	64
Figura 5.10: Esquema do tambor do guincho com 3 layers de cabo. ....	65
Figura 6.1: Bloco atual do balão principal; (a) Vista de frente; (b) Vista lateral; (c) Vista em perspetiva. ....	71
Figura 6.2: Novo bloco do balão principal; (a) Vista de frente; (b) Vista lateral; (c) Vista em perspetiva. ....	71
Figura 6.3: Posições dos suportes do motor; (a) Bloco atual; (b) Bloco alterado. ....	72
Figura 6.4: Bloco do balão secundário com rotação imposta; (a) Vista de frente; (b) Vista lateral; (c) Vista em perspetiva. ....	73
Figura 6.5: Bloco de balão secundário sem rotação imposta; (a) Vista de frente; (b) Vista lateral; (c) Vista em perspetiva). ....	74
Figura 6.6: Diferença entre bumerangue atual e alterado; (a) Bumerangue de um dos topos do balão principal para o caso onde a plataforma é constituída por apenas um balão (caso atual); (b) Bumerangue para o cenário onde são acoplados balões secundários. ....	76
Figura 6.7: Dimensões dos bumerangues conforme o tipo de balão e local de instalação. ....	76
Figura 6.8: Bumerangue e peças a fixar neste; (a) Furos a realizar nos bumerangues; (b) Peça com dois olhais para fixar cable grip; (c) Peça com um olhal onde liga uma manilha. ....	77
Figura 6.9: Peças de ligação e peça com um olhal do balão principal; (a) Peça de ligação fixa no bloco do balão principal; (b) Peça com um olhal e manilha G-209 5/16 para encaminhamento do cabo principal colocada na extremidade do bumerangue. ....	78

Figura 6.10: Sistema de acoplamento de um balão secundário com rotação; (a) Sistema composto por uma manilha G-209A 1/2 e peça de ligação comum; (b) Sistema composto pela peça de ligação reforçada e manilha G-209A 5/8 a utilizar no caso extremo. ....	79
Figura 6.11: Vista explodida da montagem da peça com olhais que permite a fixação da peça de ligação para acoplamento dos balões secundários à plataforma (bloco de um balão secundário sem rotação). ....	80
Figura 6.12: Sistema de acoplamento comum aos balões secundários com rotação imposta com as peças de ligação e peças com olhais já montadas e fixas. ....	80
Figura 6.13: Abraçadeira fixa à proteção do motor; (a) Abraçadeira da empresa Global Industrial; (b) Dimensões mais relevantes. ....	81
Figura 6.14: Troço de mola beta; (a) Troço de mola beta utilizado na fixação das cavilhas; (b) Principais dimensões ....	82
Figura 6.15: Cable Grip do modelo A Type da empresa Slingco. ....	83
Figura 6.16: Sistema de fixação do cable grip e peça de ligação (a) Vista explodida da montagem do cable grip à respetiva peça de ligação e bumerangue; (b) Sistema já montado. ....	83
Figura 6.17: Modos distintos de fixação das duas cavilhas (troço de mola beta e freio circular exterior). ....	84
Figura 6.18: Abraçadeira e modo de montagem no sistema; (a) Abraçadeira Micro Seal da empresa Precision Brand; (b) Modo de instalação no cable grip. ....	84
Figura 6.19: Forças resultantes que atuam em cada balão da plataforma e força de tração em cada par de cabos que ligam os vários balões. ....	85
Figura 6.20: Momentos sobre a peça com dois olhais originados pela força de tração nos parafusos e força perpendicular aos eixos destes. ....	89
Figura 6.21: Secções da cavilha sujeitas a tensões de corte. ....	92
Figura 6.22: Secções da cavilha sujeitas a tensões normais. ....	93
Figura 6.23: Casquilho PTFE composite sem flange da empresa SKF. ....	95
Figura 6.24: Forças aplicadas no sistema de acoplamento do balão principal; (a) Forças durante o seu funcionamento; (b) Forças durante o processo de aterragem. ....	98
Figura 6.25: Resultados referentes à simulação do balão principal no caso extremo de funcionamento da plataforma; (a) Tensões equivalentes de Von Mises; (b) Deslocamento dos componentes. ....	98
Figura 6.26: Resultados referentes à simulação do balão principal no caso extremo do processo de aterragem; (a) Tensões equivalentes de Von Mises; (b) Deslocamento dos componentes. ....	99
Figura 6.27: Forças aplicadas no sistema de acoplamento de um balão secundário com rotação; (a) Forças durante o seu funcionamento na peça de ligação inferior; (b) Forças durante o seu funcionamento na peça de ligação superior; (c) Forças durante o processo de aterragem. ....	100

Figura 6.28: Resultados referentes à simulação de um balão secundário com rotação no caso extremo de funcionamento da plataforma (peça de ligação inferior); (a) Tensões equivalentes de Von Mises; (b) Deslocamento dos componentes.....	101
Figura 6.29: Resultados referentes à simulação de um balão secundário com rotação no caso extremo de funcionamento da plataforma (peça de ligação superior); (a) Tensões equivalentes de Von Mises; (b) Deslocamento dos componentes.....	102
Figura 6.30: Resultados referentes à simulação de um balão secundário com rotação no caso extremo do processo de aterragem; (a) Tensões equivalentes de Von Mises; (b) Deslocamento dos componentes. ....	103
Figura 6.31: Forças aplicadas no sistema de acoplamento de um balão secundário sem rotação; (a) Forças durante o seu funcionamento; (b) Forças durante o processo de aterragem. ....	104
Figura 6.32: Resultados referentes à simulação de um balão secundário sem rotação no caso extremo de funcionamento da plataforma; (a) Tensões equivalentes de Von Mises; (b) Deslocamento dos componentes. ....	105
Figura 6.33: Resultados referentes à simulação de um balão secundário sem rotação no caso extremo do processo de aterragem; (a) Tensões equivalentes de Von Mises; (b) Deslocamento dos componentes. ....	106
Figura 7.1: Base do conjunto em forma de torre com destaque para a zona de encontro entre os perfis retangulares. ....	110
Figura 7.2: Perfis centrais responsáveis pela ligação da base ao ponto mais baixo da base em forma de berço. ....	111
Figura 7.3: Estrutura do subsistema em forma de torre. ....	112
Figura 7.4: Posicionamento das cantoneiras na estrutura auxiliar; (a) Vista lateral; (b) Vista de frente; (c) Vista em perspetiva. ....	113
Figura 7.5: Perfis em T ligados às cantoneiras e utilizados para reforçar a base em berço da estrutura. ....	114
Figura 7.6: Rolo da série 1700 com spring-loaded shaft do fabricante Interroll. ....	115
Figura 7.7: Dimensões do rolo escolhido. ....	116
Figura 7.8: Vista em corte da base em forma de berço da estrutura em torre com destaque para as posições dos rolos face aos perfis em T identificados pelas letras E e C. ....	116
Figura 7.9: Base em forma de berço da estrutura em torre. ....	117
Figura 7.10: Chapas de proteção; (a) Chapa de proteção já quinada e em forma de U; (b) Correto posicionamento das chapas no conjunto da estrutura auxiliar. ....	118
Figura 7.11: Roda de transporte utilizada; (a) Roda de transporte Re.E3-150-SBF da empresa Elesá; (b) Respetivo modelo CAD. ....	119
Figura 7.12: Dimensões da roda de transporte Re.E3-150-SBF da empresa Elesá.....	120
Figura 7.13: Chapas usadas para a fixação das rodas de transporte à estrutura auxiliar; (a) Chapa usada nos cantos; (b) Chapa usada nos nós centrais. ....	120

Figura 7.14: Correta posição na base da estrutura das chapas de fixação das rodas de transporte. ....	121
Figura 7.15: Disposição de uma das cintas de amarração (a amarelo) utilizada no constrangimento do balão principal. ....	122
Figura 7.16: Vista lateral da estrutura auxiliar já com o balão principal aterrado e cintas devidamente colocadas.....	122
Figura 7.17: Cinta de amarração da empresa Budin Ferramentas.....	123
Figura 7.18: Varão soldado à base da estrutura onde são fixas as cintas de amarração.....	123
Figura 7.19: Corpo principal da estrutura de ligação com destaque para o perfil em C e ligação dos perfis quadrados a este. ....	124
Figura 7.20: Grupos de perfis tubulares quadrados adicionados obliquamente ao sistema de ligação (cores ilustrativas meramente utilizadas para distinguir ambos os grupos).....	125
Figura 7.21: Componentes que garantem a fixação dos dois módulos; (a) Chapa quinada do subsistema de ligação; (b) Chapa do subsistema em forma de torre.....	126
Figura 7.22: Sistema de ligação (semelhante nas 4 extremidades) usado no acoplamento dos dois subsistemas.....	126
Figura 7.23: Estrutura auxiliar, composta pelos três distintos subsistemas, já devidamente montada.....	127
Figura 7.24: Processo de aterragem com recurso à estrutura auxiliar; (a) Esquema do processo; (b) Representação da distância recomendada, $z$ , entre a estrutura e os pórticos. .	128
Figura 7.25: Distância ideal e mínima entre pórticos e estrutura auxiliar para cada um dos tipos de balões conforme o valor do ângulo de equilíbrio. ....	129
Figura 7.26: Componentes na direção dos três eixos do comprimento do cabo auxiliar desde do balão até ao pórtico que falta recolher. ....	131
Figura 7.27: Gráfico que relaciona a força realizada pelos guinchos auxiliares com o comprimento de cabo que já foi recolhido. ....	133
Figura 7.28: Forças aplicadas na estrutura auxiliar durante a correta aterragem do balão principal. ....	135
Figura 7.29: Valores das tensões equivalentes de Von Mises originadas pela correta aterragem do balão principal; (a) Vista geral; (b) Pormenor da zona mais solicitada.....	136
Figura 7.30: Deformação originada nos componentes pela correta aterragem do balão principal. ....	137
Figura 7.31: Forças aplicadas na estrutura auxiliar devido ao embate do balão principal na extremidade mais distante da base da estrutura. ....	137
Figura 7.32: Valores das tensões equivalentes de Von Mises originadas pelo embate do balão principal na extremidade mais distante da base da estrutura; (a) Vista geral; (b) Pormenor da zona mais solicitada. ....	138
Figura 7.33: Deformação originada nos componentes pelo embate do balão principal na extremidade mais distante da base da estrutura. ....	138

Figura 7.34: Forças aplicadas na estrutura auxiliar devido ao embate do balão principal numa das quinas da base da estrutura. ....	139
Figura 7.35: Valores das tensões equivalentes de Von Mises originadas pelo embate do balão principal numa das quinas da base da estrutura. ....	139
Figura 7.36: Pormenor das zonas onde as concentrações de tensões são mais elevadas no cenário de embate do balão principal numa das quinas da base da estrutura. ....	140
Figura 7.37: Deformação originada nos componentes pelo embate do balão principal numa das quinas da base da estrutura. ....	140



## Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Características do cabo Dynex da empresa Hampidjan.....	12
Tabela 4.1: Comparação entre as três hipóteses. ....	42
Tabela 5.1: Dimensões e valor da área projetada dos dois tipos de balões. ....	46
Tabela 5.2: Valores das forças de arrasto que atuam nos balões quando estes não têm rotação imposta. ....	48
Tabela 5.3: Valores dos coeficientes de arrasto e de sustentação para os dois tipos de balões com rotação imposta e velocidade do vento e velocidade angular máximas. ....	50
Tabela 5.4: Valores das forças de arrasto, sustentação e resultante para os dois tipos de balões com rotação imposta e velocidade do vento e velocidade angular máximas. ....	50
Tabela 5.5: Valores dos coeficientes de arrasto e de sustentação para os dois tipos de balões com rotação imposta durante os processos de descolagem e aterragem. ....	51
Tabela 5.6: Valores das forças de arrasto, sustentação e resultante para os dois tipos de balões com rotação imposta durante os processos de descolagem e aterragem.....	51
Tabela 5.7: Valores das forças de impulsão resultantes e pesos dos dois tipos de balões.....	53
Tabela 5.8: Valores dos ângulos de equilíbrio de uma plataforma composta pelo balão principal com rotação e três balões secundários sem rotação em função das velocidades de vento (De notar que os valores das forças referentes ao balão secundário são dados por unidade). ....	56
Tabela 5.9: Valores dos ângulos de equilíbrio em função do número de balões que constituem a plataforma durante o processo de aterragem (com $U_{\infty}=7$ m/s e $\omega=35$ RPM para o balão principal). ....	57
Tabela 5.10: Especificações dos guinchos auxiliares atuais da empresa para um cabo de Dyneema de diâmetro 6 mm. ....	63
Tabela 5.11: Dimensões e características mais relevantes do guincho CWG-30375.....	64
Tabela 5.12: Especificações dos novos guinchos auxiliares CWG-30375 para um cabo de Dyneema com diâmetro 6 mm. ....	66
Tabela 6.1: Valores das forças resultantes dos dois tipos de balões com rotação imposta e velocidade do vento e velocidade angular iguais a 18 m/s e 40 RPM.....	87
Tabela 7.1: Propriedades mecânicas do aço S235JRH .....	109
Tabela 7.2: Dimensões do rolo escolhido. ....	115
Tabela 7.3: Valores das distâncias ideais com base no ângulo de equilíbrio e tipo de balão para o cenário de aterragem de uma plataforma constituída por 4 balões (com $U_{\infty}=7$ m/s e $\omega=35$ RPM para o balão principal). ....	130
Tabela 7.4: Ângulo de equilíbrio, componentes e comprimento de cabo auxiliar (desde do balão até ao pórtico) por recolher ao longo de um processo de aterragem de uma plataforma constituída por 4 balões (com $U_{\infty}=7$ m/s e $\omega=35$ RPM para o balão principal). ....	132



## Lista de Abreviaturas

CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho assistido por computador)
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão de Normalização)
EN	<i>European Norm</i> (Norma Europeia)
LEMAP	<i>Long Endurance Medium Altitude Platform</i> (Plataforma de Média Altitude de Longa Resistência)
MEF	Método dos elementos finitos
RPM	Rotações por Minuto
TARS	<i>Tethered Aerostat Radar System</i> (Sistema de radar com base num aeróstato ancorado)



# Simbologia

## Caracteres Latinos

$A$	Área projetada do balão
$A_{cav}$	Área transversal da cavilha
$A_p$	Área planificada da superfície do balão
$A_{proj}$	Área projetada de secção retangular
$A_{proj_1}$	Área projetada da secção retangular 1 da cavilha
$A_{proj_2}$	Área projetada da secção retangular 2 da cavilha
$A_{res}$	Área resistente dos parafusos
$b_c$	Comprimento do casquilho
$B$	Binário do tambor
$C$	Comprimento desde da superfície do tambor até ao topo da flange
$C_D$	Coeficiente de arrasto
$C_L$	Coeficiente de sustentação
$C_x$	Comprimento do cabo auxiliar desde do balão ao pórtico que falta recolher segundo o eixo $X$
$C_y$	Comprimento do cabo auxiliar desde do balão ao pórtico que falta recolher segundo o eixo $Y$
$C_z$	Comprimento do cabo auxiliar desde do balão ao pórtico que falta recolher segundo o eixo $Z$
$d$	Diâmetro do balão
$d_c$	Diâmetro do casquilho
$d_p$	Diâmetro do parafuso
$d_{cav.}$	Diâmetro da cavilha
$e$	Espessura da peça com os olhais
$F$	Força aerodinâmica resultante
$F_{cav.}$	Força exercida na cavilha
$F_D$	Força de arrasto
$F_{DBP}$	Força de arrasto do balão principal
$F_{DBS}$	Força de arrasto do balão secundário
$F_{embate}$	Força de embate provocada pela aterragem dos balões
$F_G$	Força resultante realizada por cada guincho
$F_{G'}$	Força resultante realizada por cada guincho no plano $XY$
$F_{G''}$	Força resultante realizada por cada guincho no plano $YZ$
$F_L$	Força de sustentação
$F_{LBP}$	Força de sustentação do balão principal
$F_{LBS}$	Força de sustentação do balão secundário
$F_p$	Força aplicada paralelamente aos eixos dos parafusos
$F_{pp}$	Força aplicada perpendicularmente aos eixos dos parafusos
$F_{RBP}$	Força resultante que atua no balão principal
$F_{RBS}$	Força resultante que atua no balão secundário
$F_T$	Força de tração que atua em cada cabo principal

$F_{tG}$	Força de tração/recolha que cada guincho auxiliar realiza
$F_X$	Força realizada por cada guincho segundo o eixo X
$F_Y$	Força realizada por cada guincho segundo o eixo Y
$F_Z$	Força realizada por cada guincho segundo o eixo Z
$g$	Aceleração da gravidade
$H$	Comprimento do fuso
$H_{bumerangue}$	Comprimento total do bumerangue
$H'_{bumerangue}$	Comprimento da zona vertical do bumerangue
$H_{est.}$	Altura desde do solo até ao ponto mais baixo da base em berço da estrutura auxiliar
$H_{port.}$	Altura do pórtico
$I$	Força de impulsão resultante
$I_{BP}$	Força de impulsão resultante do balão principal
$I_{BS}$	Força de impulsão resultante do balão secundário
$l_1$	Comprimento da cinta desde da base da estrutura auxiliar até ao ponto tangente ao balão
$l_2$	Comprimento da cinta em contacto com o balão
$L$	Comprimento do balão
$L_{cabo\ arm.}$	Comprimento total do cabo armazenado no tambor do guincho
$L_{tambor}$	Comprimento do tambor
$M_N$	Momento em torno do ponto A criado pela força $N$
$M_{PP}$	Momento em torno do ponto A criado pela força $F_{pp}$
$N$	Força de tração no parafuso
$N_{layersmax}$	Número máximo de <i>layers</i> que o tambor suporta
$P$	Peso do balão
$P_{BP}$	Peso do balão principal
$P_{BS}$	Peso do balão secundário
$P_{superficial}$	Pressão superficial aplicada no casquilho
$r$	Raio do balão
$R_{bumerangue}$	Raio de curvatura da extremidade curva do bumerangue
$Re$	Número de Reynolds
$t$	Espessura Nominal do aço
$U_\infty$	Velocidade do escoamento
$V$	Volume do balão
$V_{recolha}$	Velocidade de recolha de cada cabo auxiliar por parte dos guinchos auxiliares
$x$	Razão de velocidades
$x_1$	Comprimento da secção 1 da cavilha
$x_2$	Comprimento da secção 2 da cavilha
$x_N$	Distância entre a linha de ação da força $N$ e o ponto A
$x_{PP}$	Distância entre a linha de ação da força $F_{pp}$ e o ponto A
$z$	Distância recomendada entre o plano que passa no centro dos pórticos e o plano de simetria do subsistema em forma de torre da estrutura auxiliar

## Caracteres Gregos

$\alpha$	Ângulo de equilíbrio dos cabos auxiliares com a horizontal no plano XY
$\theta$	Ângulo de equilíbrio dos cabos auxiliares com a horizontal no plano YZ
$\mu$	Coeficiente de atrito
$\mu_{ar}$	Viscosidade do ar
$\rho_{ar}$	Massa volúmica do ar
$\rho_{He}$	Massa volúmica do hélio
$\sigma_{ADM_c}$	Tensão admissível da cavilha
$\sigma_{ADM_p}$	Tensão admissível do parafuso
$\sigma_{ADM_{po}}$	Tensão admissível da peça com os olhais
$\sigma_{COM}$	Tensão de comparação
$\sigma_e$	Tensão de esmagamento
$\sigma_N$	Tensão normal
$\tau$	Tensão de corte
$\emptyset_{cabo}$	Diâmetro do cabo
$\emptyset_{flange}$	Diâmetro da flange do tambor





# 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

Segundo as Agências Espaciais o mercado da *Global Monitoring, Environment and Security, Geographic Information Systems* e *Earth Observation* apresenta uma grande margem de evolução e crescimento [1], sendo este um mercado bastante explorado por várias empresas em todo o mundo. A *Omnidea* é uma destas empresas.

Tendo inicialmente entrado no mercado com o objetivo de incentivar ao uso de energias limpas, atualmente a meta passa sobretudo pela implementação no mercado de equipamentos aéreos estáticos capazes de observar e monitorizar territórios e estender sinais de telecomunicações. No momento, trabalha-se no projeto *Long Endurance Medium Altitude Platform* (LEMAP) sendo a principal inovação o facto de a plataforma possuir não só um balão mas sim vários. Este aspeto é único e inovador em todo o mundo.

Com o intuito de melhorar a *performance* e aumentar a altitude e carga útil que as plataformas aéreas já desenvolvidas na empresa conseguem alcançar e carregar, surge um novo desafio e conceito inovador que consiste numa plataforma ancorada com múltiplos aeróstatos mais leves do que o ar empilhados na vertical e espaçados entre si de forma a que cada balão possa operar com o efeito *Magnus* havendo uma interligação por cabos entre estas estruturas.

O tema para esta dissertação surge da complexidade das operações de acoplamento, descolagem e aterragem de uma plataforma deste género. Tendo por base o sistema anteriormente desenvolvido pela empresa com apenas um balão mais leve que o ar, o objetivo é garantir que, independentemente do número de balões que constituam a plataforma, esta

consiga sempre descolar e aterrar sem qualquer problema, com especial atenção para a segurança de todos os operadores envolvidos nestes procedimentos e repetibilidade de execução das operações.

Atualmente, a plataforma aérea do projeto LEMAP (Figura 1.1) consiste apenas num balão de forma cilíndrica que se encontra sempre ligado ao chão por cabos. Esta plataforma apresenta-se como sendo um caso inovador no que diz respeito ao mercado de plataformas mais leves que o ar ancoradas e aeróstatos com as mesmas funções já que (para além de passar a ser constituída por múltiplos balões) a levitação dos balões dá-se devido ao conjunto de dois fatores [2].

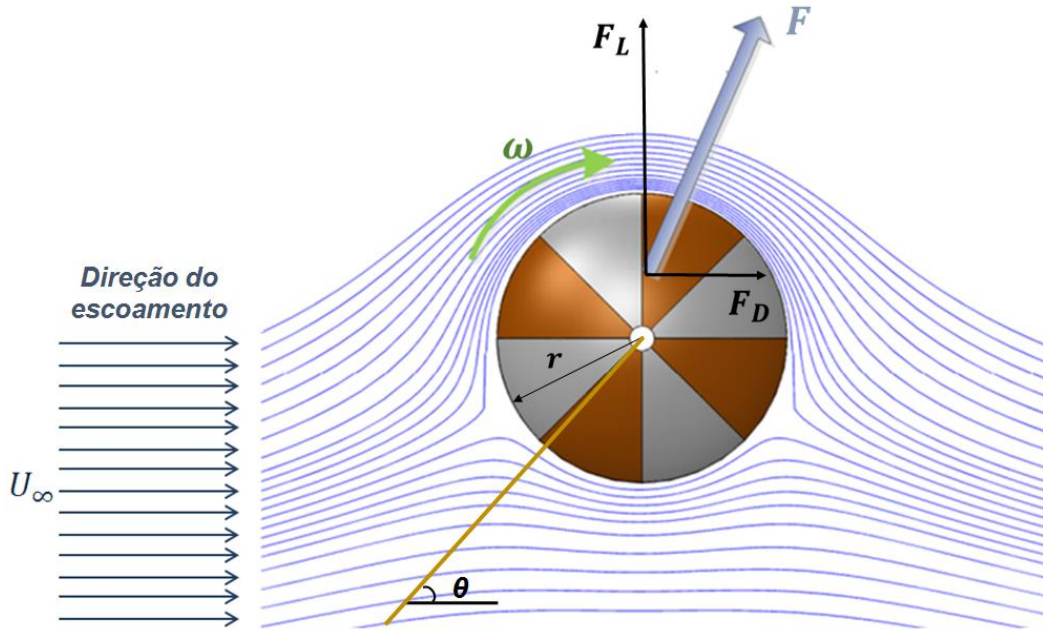


**Figura 1.1: Balão principal da plataforma mais leve que o ar.**

Um dos fatores é a força de impulsão criada devido ao facto dos balões serem insuflados com hélio, originando assim uma diferença de densidades com o ar atmosférico circundante. Porém, devido às dimensões dos balões, é sabido que a força de impulsão gerada é de pequena intensidade, fazendo com que o segundo fator seja o mais relevante. Este aspeto é então a sustentação criada graças à rotação dos balões imposta por dois motores presentes nas zonas dos topos dos cilindros [2]. A origem desta força aerodinâmica de sustentação é justificada pelo efeito de *Magnus*.

O efeito *Magnus* apresenta-se como um fenómeno físico capaz de ser observado em corpos em rotações de secção circular, tais como cilindros ou esferas, que estejam imersos num fluido em movimento.

Neste caso, devido à rotação do balão cilíndrico, o escoamento de ar em torno deste é de certa forma alterado já que a rotação do cilindro extrai o ar que passa na parte superior do balão e empurra-o contra o ar que entra e passa na parte inferior. Deste modo é criada uma zona de alta e de baixa pressão, respetivamente, na zona inferior (campos de velocidade com sentidos opostos) e superior (campos de velocidade com mesmo sentido) do cilindro [3]. Esta diferença de pressão por sua vez origina a força aerodinâmica de sustentação (Figura 1.2).



**Figura 1.2: Força aerodinâmica criada pelo efeito de Magnus (adaptado de [2]).**

Na Figura 1.2,  $F$  representa a força aerodinâmica de sustentação resultante,  $F_L$  a força de sustentação,  $F_D$  a força de arrasto,  $\omega$  a velocidade angular do balão,  $r$  o raio do balão,  $U_\infty$  a velocidade do escoamento, neste caso ar e  $\theta$  o ângulo de equilíbrio que os balões fazem com a horizontal.

Para calcular o valor da força aerodinâmica de sustentação é necessário determinar o valor da força de arrasto (*Drag*),  $F_D$ , e força de sustentação (*Lift*),  $F_L$ .

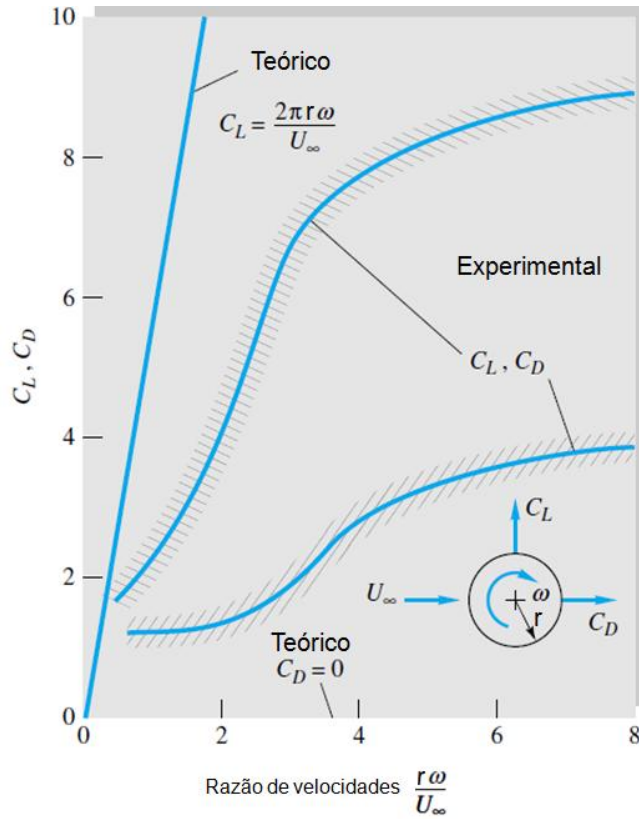
Estas forças são dadas, respetivamente por:

$$F_D = \frac{1}{2} \times \rho_{ar} \times A \times C_D \times U_\infty^2 \quad (1.1)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \times \rho_{ar} \times A \times C_L \times U_\infty^2 \quad (1.2)$$

Com  $\rho_{ar}$  sendo a massa volúmica do fluido (neste caso ar),  $A$  a área projetada do balão no sentido do escoamento,  $U_\infty$  a velocidade do escoamento e  $C_D$  e  $C_L$  os coeficientes de arrasto e sustentação respetivamente.

Para obter os valores dos dois coeficientes recorre-se ao gráfico da Figura 1.3 que representa os coeficientes de arrasto e sustentação teóricos e experimentais para um cilindro em rotação. Os valores dos coeficientes são obtidos com base na razão das velocidades, calculada através do coeficiente entre o produto do raio do cilindro com a velocidade angular e a velocidade do escoamento.



**Figura 1.3: Gráfico dos coeficientes de arrasto e sustentação teóricos e experimentais para um cilindro em rotação em função da razão de velocidades (adaptado de [4]).**

A intensidade da força aerodinâmica resultante é então obtida através da força de arrasto e força de sustentação da seguinte forma (de notar que não é tido em consideração neste caso a força de impulsão e o peso de cada balão).

$$F = \sqrt{F_D^2 + F_L^2} \quad (1.3)$$

As forças de sustentação e arrasto são também relevantes no cálculo do ângulo de equilíbrio que os balões fazem com a horizontal, sendo este dado por:

$$\theta = \arctg\left(\frac{F_L + I - P}{F_D}\right) \quad (1.4)$$

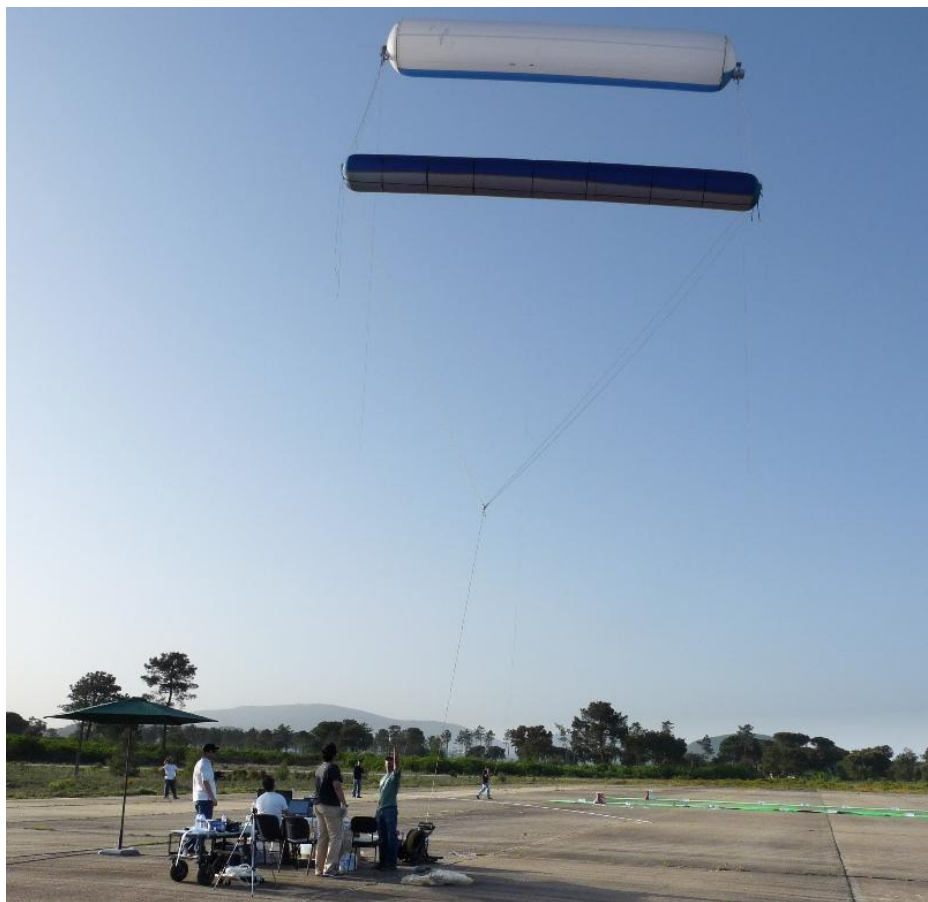
Com  $I$  sendo a força de impulsão resultante e  $P$  o peso do balão.

O papel da rotação é bastante importante já que, apesar do hélio garantir a elevação dos balões, para crescentes altitudes a força de impulsão criada devido ao gás torna-se cada vez menor, podendo chegar ao ponto de ser igual ou menor que o peso total da plataforma fazendo com que esta desça. A rotação e consequente efeito de *Magnus* servem para evitar este acontecimento.

A juntar à plataforma, existem outros componentes que constituem todo o sistema tais como os guinchos auxiliares e principal e os cabos também auxiliares e principais.

Em operação, como já referido, a plataforma está sempre ligada ao chão por cabos. Através de um cabo umbilical principal, com funções estruturais e elétricas, é feita a ligação do guincho principal ao *Bridle Point* (o Bridle Point é detalhado no subcapítulo 2.1.4). A partir deste ponto, o cabo principal é dividido em quatro cabos distintos, sendo a ligação estrutural assegurada por cabos de *Dyneema* e a elétrica por cabos elétricos. Tanto os cabos de *Dyneema* como os cabos elétricos ligam-se aos balões nas zonas dos dois topos onde se encontram, também como já referido anteriormente, os dois motores que impõem a rotação aos cilindros. Ligados, também, nos dois topos dos balões existem cabos auxiliares de *Dyneema* que, como o nome indica, servem para auxiliar os processos de descolagem e aterragem da plataforma. Quando a plataforma descola, estes cabos são fixos ao *Bridle Point*, no caso do balão mais baixo, ou aos balões imediatamente abaixo, no caso dos restantes balões. Com a plataforma no ar, os cabos auxiliares ficam frouxos e em suspensão devido ao facto de terem sempre comprimento superior à distância entre os balões. Quando se procede à aterragem, os cabos são desacoplados do *Bridle Point* ou dos balões onde estão ligados.

Devido ao grande número de cabos estruturais e auxiliares (entre outros) envolvidos em todo o sistema, os processos de descolagem e de aterragem apresentam dificuldades adicionais à medida que se aumenta o número de balões da plataforma (Figura 1.4). O projeto de uma estrutura que auxilie os processos de descolagem e de aterragem e de um sistema que assegure o acoplamento dos balões aos cabos principais estão na base desta dissertação.



**Figura 1.4: Plataforma aérea constituída por dois balões [5].**

## 1.2 Motivação

Analisando a enorme margem de evolução do mercado *Global Monitoring, Environment and Security* e *Geographic Information Systems* e os objetivos da empresa *Omnidea* conclui-se que estamos perante um projeto bastante inovador, revolucionário e com boas expectativas futuras já que se trata de uma ideia que pode ser, a níveis mundiais, bastante útil ajudando, por exemplo, a prevenir e a combater incêndios florestais ou melhorar as telecomunicações.

O desenvolvimento propriamente dito de todo o projeto mecânico por detrás do melhoramento e da inovação de uma plataforma aérea constituída por múltiplos balões é sem dúvida um grande desafio e com certeza uma grande mais-valia já que permite estar em contacto com um verdadeiro projeto e problema de engenharia. É de esperar que haja também uma grande utilização dos conceitos adquiridos ao longo dos cinco anos do curso de Engenharia Mecânica, ajudando assim a consolidar tudo o que foi aprendido neste período.

Assim sendo, considerando todo o trabalho desenvolvido pela *Omnidea* e a oportunidade que esta oferece em realizar um projeto com a própria equipa, suscitou um grande interesse e motivação, que culminou com o desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

## 1.3 Objetivos

A presente dissertação tem como principais objetivos o estudo e projeto de um sistema de acoplamento de balões a uma plataforma ancorada mais leve que o ar e de uma estrutura capaz de auxiliar os processos de descolagem e aterragem dos múltiplos balões que constituem essa mesma plataforma aérea.

É um objetivo desta dissertação projetar um sistema que torne possível o acoplamento dos vários balões aos cabos principais que constituem a plataforma e assim criar um sistema composto por múltiplos balões. Este mecanismo de ligação deverá ser resistente e de simples e rápida montagem de modo a permitir também um simples e rápido acoplamento e desacoplamento dos balões do conjunto quando requerido.

A outra meta desta dissertação passa pelo projeto e desenvolvimento de uma estrutura auxiliar dos processos de descolagem e aterragem. É objetivo que a estrutura funcione independentemente do tipo de balão que constitua a plataforma, sendo então necessário que esta suporte os esforços provocados por ambos os tipos de balões aquando da sua aterragem (individual). É vantajoso que a base onde os balões assentam permita a sua livre rotação. A estrutura auxiliar terá também de ser móvel, tendo de ter obrigatoriamente na sua composição, rodas de transporte. O peso total do sistema também não poderá ser demasiado elevado.

É importante definir inicialmente quais os principais problemas e riscos envolvidos nas operações de aterragem e descolagem da plataforma, assim como as várias hipóteses que solucionam o problema. Tendo tudo isto em consideração, é possível chegar à melhor solução garantindo assim que o dimensionamento mecânico dos novos sistemas cumpre todos os requisitos e objetivos propostos.

## **1.4 Estrutura da dissertação**

A presente dissertação está dividida em oito principais capítulos onde são tratadas e apresentadas todas as considerações relevantes para a concepção do sistema de acoplamento dos vários balões à plataforma aérea e projeto da estrutura auxiliar dos processos de descolagem e aterragem.

No capítulo 1 é feita uma breve introdução e enquadramento do projeto da empresa, sendo referidas também as motivações, os problemas a resolver e os objetivos a alcançar com esta dissertação.

No 2º capítulo é apresentado de forma mais aprofundada o projeto da *Omnidea* sendo destacado tanto os componentes que constituem o sistema em desenvolvimento como os procedimentos levados para a descolagem e aterragem da plataforma atual. São referidas ainda outras empresas que recorrem a tecnologias idênticas à estudada nesta dissertação.

O capítulo 3 sumaria as principais considerações impostas pela empresa e levadas ao longo da dissertação. São detalhadas também neste capítulo as maiores diferenças entre o balão principal e os balões secundários que irão compor a plataforma.

No 4º capítulo, são apresentadas as três principais hipóteses para solucionar o problema da descolagem e aterragem de uma plataforma ancorada constituída por múltiplos balões. Ao longo do capítulo são sumariados os pontos fortes e fracos de cada cenário, sendo realizado inclusive, entre as várias hipóteses, uma comparação de modo a chegar à solução mais vantajosa para a empresa.

No 5º capítulo são resumidos os cálculos das principais forças que atuam nos balões da plataforma assim como os ângulos de equilíbrio que estes descrevem com a horizontal (solo). Através dos valores obtidos é feita a seleção de uns novos guinchos auxiliares que garantam a descolagem e aterragem de uma plataforma constituída por múltiplos balões.

O capítulo 6 reúne todo o raciocínio levado no projeto dos componentes dos sistemas de acoplamento dos balões à plataforma aérea. São, também, apresentados os cálculos referentes às ligações aparafusadas e com cavilhas assim como os resultados das simulações numéricas realizadas de modo a validar os sistemas projetados.

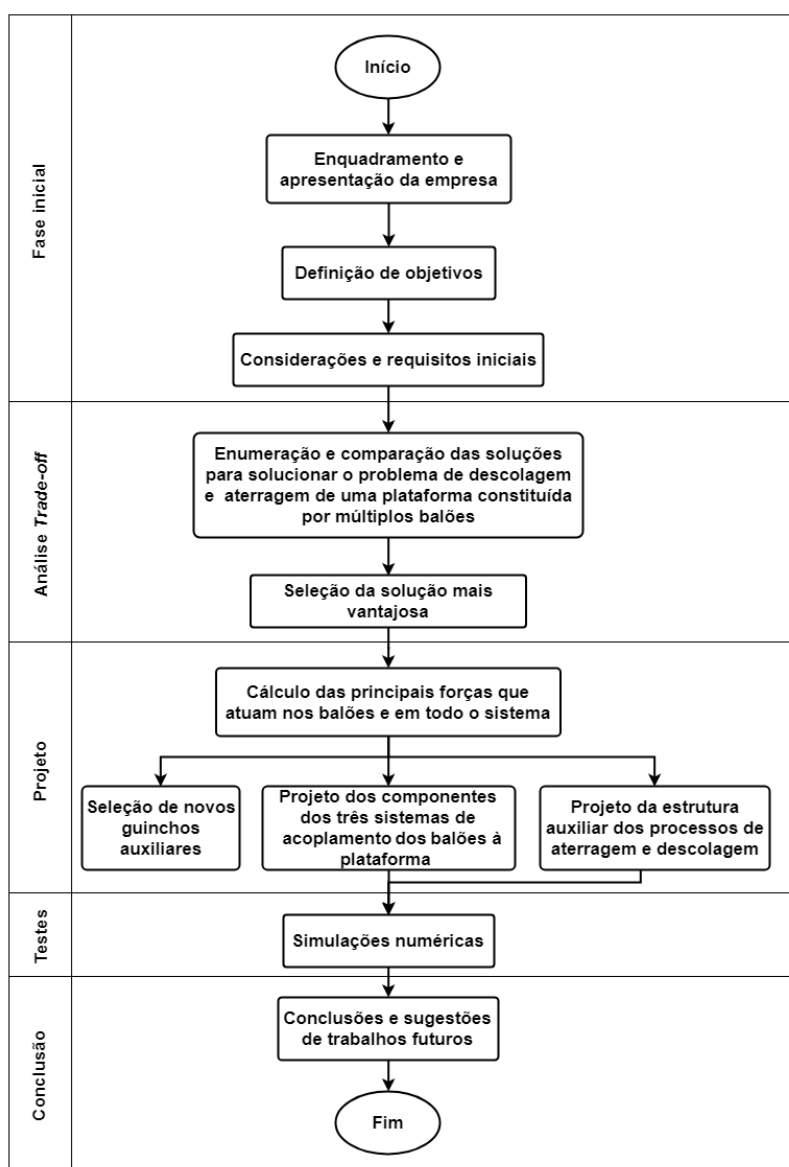
No 7º capítulo é apresentado todo o procedimento e decisões de projeto da estrutura auxiliar dos processos de descolagem e aterragem. De modo a validar o conjunto

desenvolvido, à semelhança dos sistemas de acoplamento dos balões à plataforma, são realizadas simulações numéricas.

No 8º e último capítulo são apresentadas as conclusões retiradas da ideia de uma plataforma composta por múltiplos balões e dos projetos dos sistemas de acoplamento dos balões à plataforma e da estrutura auxiliar dos processos de descolagem e aterragem. No final, são sugeridos também possíveis trabalhos e estudos futuros.

No final da dissertação são ainda reunidos anexos relativos, por exemplo, às etapas dos processos de descolagem e aterragem para as três soluções apresentadas, cálculos adicionais (como do rácio força resultante/massa e comprimento do cabo auxiliar extra) e desenhos técnicos de todos os componentes a produzir.

Na Figura 1.5 é apresentado um fluxograma que esquematiza a estrutura da dissertação.



**Figura 1.5: Fluxograma da estrutura da dissertação.**



# 2

## Sistema e tecnologia utilizados

Neste capítulo são apresentados os vários componentes que constituem o sistema em desenvolvimento da plataforma ancorada da empresa *Omnidea*. São também apontados todos os procedimentos e tarefas executados nos processos de descolagem e aterragem da plataforma atual, constituída apenas por um balão. O objetivo passa pela sensibilização para os processos de modo a que se torne mais simples a sua adaptação para o caso de uma plataforma constituída por múltiplos balões. Por último, são apresentadas outras empresas com tecnologias semelhantes às da *Omnidea*.

### 2.1 Componentes

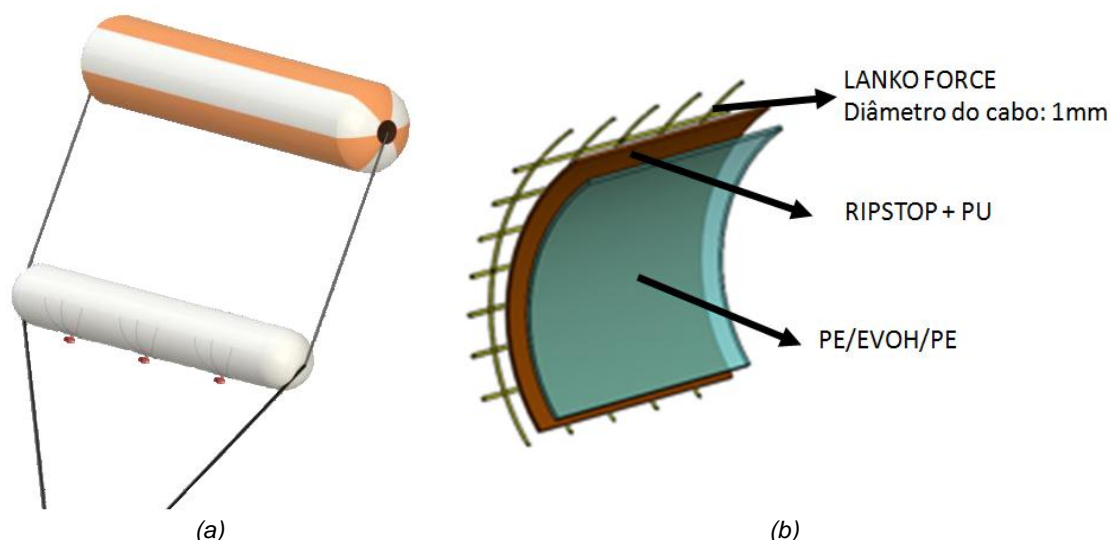
O projeto LEMAP apresenta como principais componentes a plataforma área composta por, futuramente, diversos balões, os motores que colocam o balão cilíndrico do topo a girar (e eventualmente alguns dos restantes balões secundários), os cabos principais e auxiliares e os guinchos que armazenam estes mesmos cabos. De seguida serão detalhados cada um destes componentes.

#### 2.1.1 Plataforma área

A plataforma aérea do projeto LEMAP, intitulada BOREAS, é o nome adotado para o conjunto de cabos (principais e auxiliares) e estruturas insufláveis (pelo menos dois balões) de geometrias aproximadamente cilíndricas. O balão principal, isto é, o do topo tem um comprimento de 16 metros e um diâmetro de 3,8 metros. Já os balões inferiores terão sempre

dimensão igual ou menor que o principal, sendo que o da Figura 2.1a tem um comprimento de 16 metros e um diâmetro de 2,5 metros. Ambos os balões são insuflados com hélio.

O invólucro dos vários balões é idêntico em todos os balões, sendo constituído por três camadas (Figura 2.1b). Começando pelo interior, a primeira camada é uma membrana de polietileno (PE) e de um polímero de álcool polivinílico (EVOH). A segunda camada é constituída por *nylon ripstop*, tecido este que é vulgarmente utilizado em balões de ar quente. A camada final é uma rede formada por cabo de *Dyneema* com diâmetro de 1 mm.



**Figura 2.1: Plataforma aérea e sua constituição; (a) Plataforma composta por dois balões [2]; (b) Constituição das várias camadas.**

### 2.1.2 Motores

Para obter a força aerodinâmica de sustentação através do efeito *Magnus*, nos topos dos balões que giram em torno do seu eixo longitudinal, estão colocados motores de ímanes permanentes. Estes motores são caracterizados por usarem ímanes permanentes incorporados no rotor criando assim um campo magnético constante. A sua alimentação é feita através dos cabos elétricos por onde passam 600 volts em corrente contínua. Em média, com o motor a rodar a 60 rotações por minuto (RPM), é consumido 1 kW [2].

### 2.1.3 Guincho principal e guinchos auxiliares

Para fornecer e recolher os cabos e assim controlar e executar os processos de descolagem e aterragem utiliza-se um guincho principal e dois auxiliares.

O guincho principal é o componente encarregue de controlar o cabo umbilical principal sendo que perto deste existe um componente designado *sheave*. A *sheave* (Figura 2.2a) é responsável pelo direcionamento do cabo principal garantindo assim que este tem um movimento livre e que não ocorrem problemas no alinhamento do cabo ao longo do tambor do guincho principal (Figura 2.2b).



(a)



(b)

**Figura 2.2: Componentes utilizados no sistema da empresa; (a) Sheave; (b) Guincho principal.**

Já os guinchos auxiliares apenas trabalham e controlam os cabos auxiliares.

Os dois guinchos auxiliares que a empresa *Omnidea* dispõe são idênticos e do modelo CP-500T do fabricante *COMEUP*. O guincho auxiliar é apresentado na Figura 2.3.



**Figura 2.3: Guincho CP-500T do fabricante COMEUP [6].**

É importante relembrar que os cabos auxiliares utilizados nos processos de aterragem e descolagem são cabos de *Dyneema* e não cabos de aço tal como é representado na Figura 2.3. Assim sendo, o cabo de aço é retirado dos guinchos e não é utilizado.

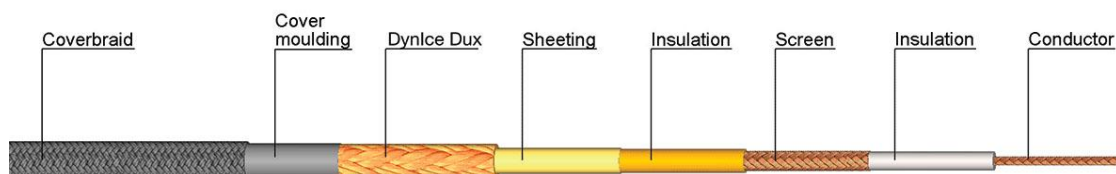
Quando comparado com o guincho principal, os guinchos auxiliares são menos potentes e com dimensões mais reduzidas. Devido ao facto dos processos de aterragem e descolagem da plataforma, quando esta é constituída por múltiplos balões, envolver forças superiores quando comparado com o cenário de uma plataforma de um só balão, é necessário

um estudo das novas forças envolvidas e dos guinchos auxiliares de modo a perceber se é possível a utilização dos atuais guinchos ou se é necessário a sua renovação

#### 2.1.4 Tipos de cabos

Em todo o projeto salienta-se o uso de dois tipos de cabos. O cabo umbilical principal, que tem tanto uma função estrutural como elétrica, e os cabos de *Dyneema* que têm um papel somente estrutural.

O cabo principal (Figura 2.4) utilizado é da empresa *Hampidjan* e tal como já foi referido, é um cabo umbilical com função estrutural e condutora. Através do material *Dyneema* é garantida e conferida a rigidez necessária para o projeto, sendo que a zona interior em cobre assegura a função condutora de energia elétrica. Na Tabela 2.1 estão sumariados alguns dados característicos deste tipo de cabo, destacando o peso de sensivelmente 180 g/m.



**Figura 2.4: Cabo Dynex da empresa Hampidjan [7].**

**Tabela 2.1: Características do cabo Dynex da empresa Hampidjan (adaptado de [7]).**

Dyndice Data					
Diâmetro total [mm]	Resistência à rotura [ton]	Safe Working Load a 5:1 [ton]	Massa volúmica [kg/dm <sup>3</sup> ]	Peso do cabo no ar [kg/m]	Peso do cabo em mar [kg/m]
13,6	9,5	1,7	1,25	0,181	0,030

Este tipo de cabo é utilizado na ligação do guincho principal ao *Bridle Point*.

O *Bridle Point* é o local onde o cabo principal é dividido em quatro cabos distintos, dois elétricos e dois estruturais, sendo que a parte estrutural passa a ser assumida por cabos de *Dyneema*. É importante salientar que neste ponto existe também uma caixa de eletrónica com componentes responsáveis pelo controlo da plataforma aérea durante o seu funcionamento e com o sistema de comunicação *wireless* com a estação terrestre. Do *Bridle Point* até aos topos dos balões a comunicação é efetuada por cabos de dados e protocolo de comunicação *CANbus*.

Os cabos auxiliares (usados para ajudar nos processos de descolagem e aterragem) e os cabos utilizados na ligação da plataforma ao *Bridle Point*, são cabos estruturais *Dyneema* (Figura 2.5)



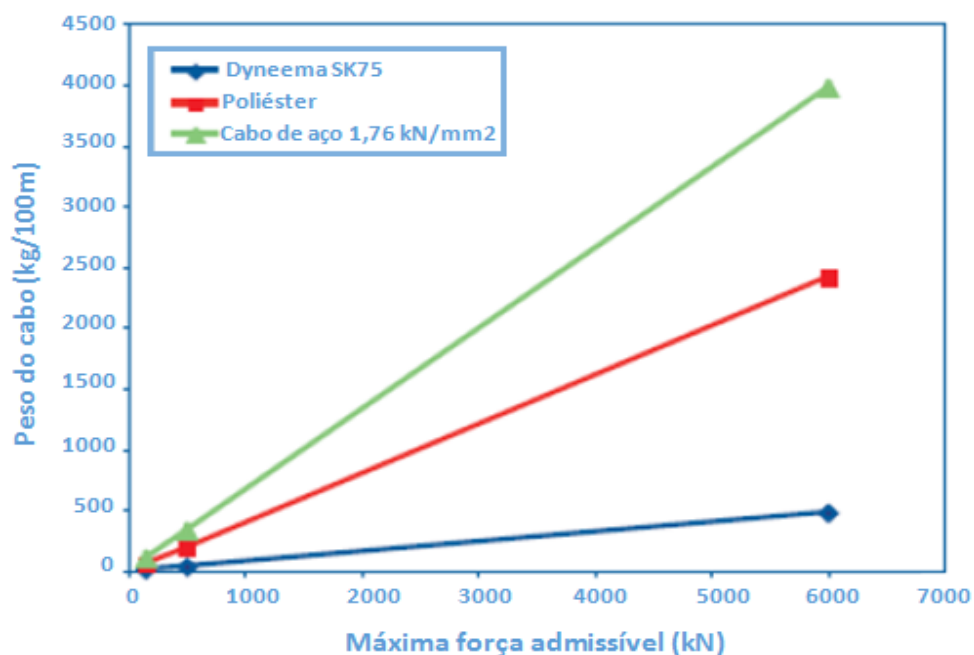
**Figura 2.5: Cabo Dyneema da empresa Lankhorst [8].**

Este tipo de cabo apresenta-se como tendo convenientes características estruturais sendo uma excelente alternativa aos típicos cabos de aço.

Os cabos de aço são componentes bastante utilizados em engenharia, nomeadamente em aplicações de reboque ou elevação muito graças à sua boa resistência ao esmagamento. Cabos de aço são facilmente encontrados, por exemplo, em sistemas de guias ou teleféricos.

Outras vantagens dos cabos de aço, quando comparado com os cabos sintéticos, são a sua durabilidade e o facto de necessitarem de pouca manutenção [9].

Porém, o que torna este tipo de cabo desinteressante para o sistema da empresa é principalmente o seu peso. Tal como é possível observar na Figura 2.6, para um mesmo valor de carga de rutura, o peso por cada 100 metros de cabo de aço é sempre superior ao dos cabos sintéticos, sendo, especificamente, cerca de 7 vezes maior que o de *Dyneema* [10].

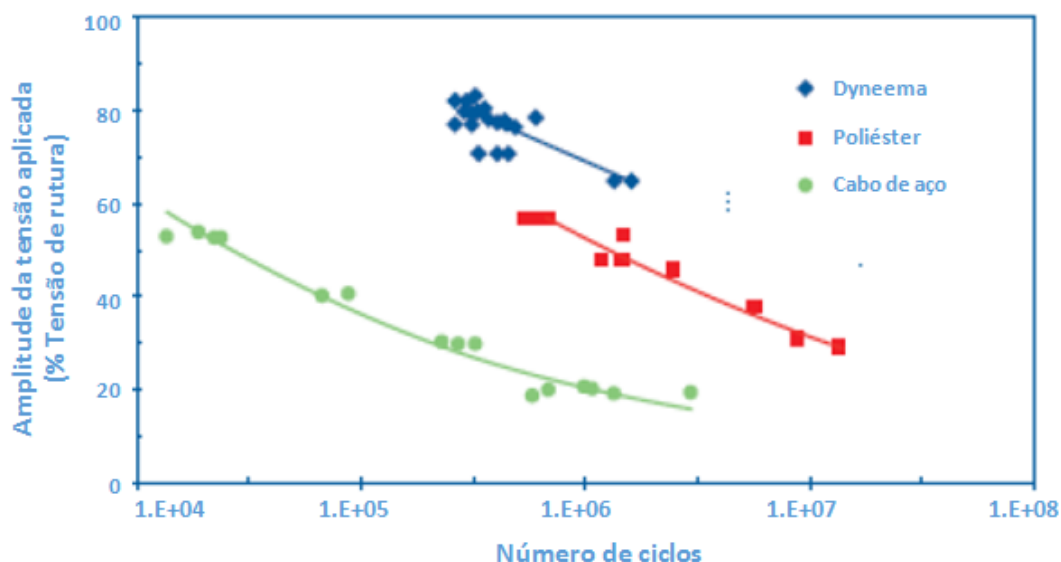


**Figura 2.6: Relação entre peso e carga suportada para um cabo de Dyneema, Poliéster e de aço (adaptado de [10]).**

Apesar de ter um preço mais elevado e não suportar esforços de esmagamento como os cabos de aço, os cabos sintéticos, e especialmente de *Dyneema*, apresentam outras características interessantes como o facto de serem flutuantes e serem mais fáceis e seguros de manusear (até sem luvas) uma vez que não há risco de desenvolver rebarbas como os cabos de aço.

Os cabos sintéticos de *Dyneema* são mais seguros também pelo facto de não acumularem e armazenarem energia como os cabos de aço. Este fator torna-os mais seguros já que não ocorrem recuos quando há a rutura dos cabos [9].

Em relação à fratura provocada por fadiga, os cabos sintéticos são muito mais resistentes quando comparado com os cabos de aço. Tal como é possível observar na Figura 2.7, para um mesmo número de ciclos, para romper um cabo de *Dyneema* é necessário aplicar, em termos percentuais, uma tensão de rutura cerca de 2 a 3,5 superior à aplicada para romper um cabo de aço.



**Figura 2.7: Comparação da resistência à fratura por fadiga entre um cabo de *Dyneema*, Poliéster e de aço (adaptado de [10]).**

A escolha da utilização de cabos *Dyneema* para o sistema da empresa é então justificada por todas as características anteriormente referidas.

O cabo utilizado é da empresa *Lankhorst* e apresenta uma maior resistência e um peso sensivelmente sete vezes menor (40 g/m) que os típicos cabos de aço. Segundo o fabricante, este cabo, constituído por fibras de *Dyneema*, tem uma grande resistência aos raios ultravioletas assim como uma boa resistência química. Outro dado importante é a absorção de água, que segundo o catálogo, é de 0% [8]. Este fator é bastante importante já que o cabo estará em contacto permanente com uma atmosfera húmida. O cabo de *Dyneema* é bastante utilizado pela indústria naval em situações como, por exemplo, o atraque e aperto de embarcações.

Tendo em conta as características de um cabo de *Dyneema* é importante considerar o desgaste que este sofre por abrasão.

Abrasão é o desgaste por atrito ou fricção que no caso deste projeto, pode ocorrer devido ao contacto do cabo de *Dyneema* com as superfícies dos guinchos auxiliares e bumerangues. Porém, segundo a *Lankhorst* este tipo de cabo tem uma excelente resistência ao desgaste por abrasão [8], provando assim ser indicado para este projeto.

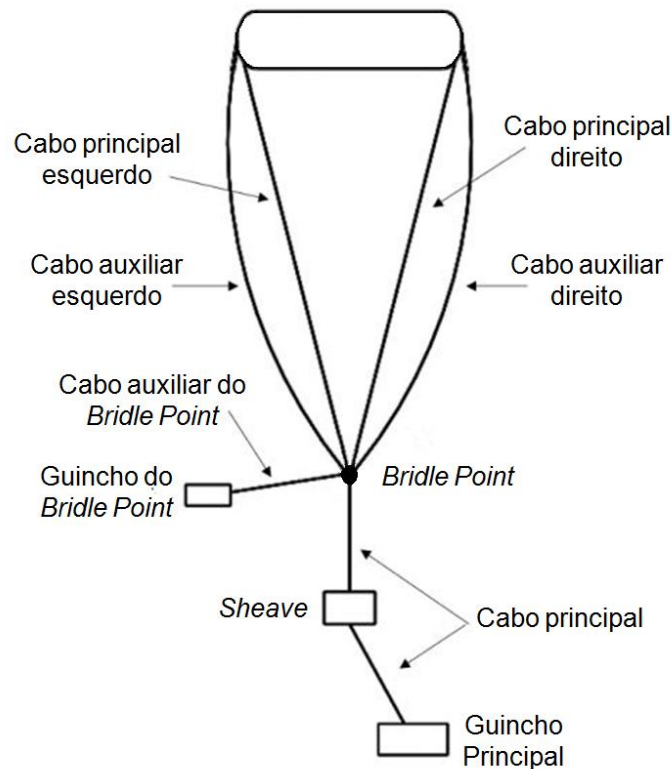
## **2.2 Etapas dos processos de descolagem e aterragem atuais**

Durante as fases de aterragem e descolagem são seguidas cuidadosamente determinadas operações de modo a garantir a segurança de todos os operadores e salvar a própria plataforma e todos os componentes envolvidos.

Os processos de aterragem e descolagem para uma plataforma constituída por um único balão englobam, atualmente, as seguintes etapas.

### **2.2.1 Fase de descolagem**

- 1) Colocação, com o auxílio de um semirreboque, da plataforma na posição conveniente para a descolagem. Nesta fase a plataforma está ancorada pelo cabo principal e pelos dois cabos auxiliares todos eles frouxos. É garantido também inicialmente que o *Bridle Point* está pousado no solo com o auxílio de um outro guincho.
- 2) Os guinchos auxiliares começam a desenrolar os cabos auxiliares e a plataforma começa a ascender devido à força de impulsão criada pelo hélio.
- 3) Devido ao facto dos cabos principais (que ligam a plataforma ao *Bridle Point*) terem um menor comprimento que os cabos auxiliares, quando os guinchos auxiliares desenrolam completamente os seus cabos, apenas os cabos principais ficam tracionados. A partir do momento que os cabos principais ficam tracionados é iniciada a rotação da plataforma. Neste instante o *Bridle Point* está ancorado pelo cabo auxiliar e pelo cabo principal frouxo que permite a passagem de energia elétrica.
- 4) Com a plataforma já no ar, desfaz-se a ligação das pontas dos cabos auxiliares dos guinchos auxiliares. Estas pontas são de seguida fixas, manualmente, no *Bridle Point* (Figura 2.8).



**Figura 2.8: Disposição dos vários cabos no processo de descolagem (adaptado de [11]).**

- 5) Com a rotação da plataforma imposta através dos motores, à medida que o balão sobe, os cabos principais são continuamente tracionados. Simultaneamente, o guincho do *Bridle Point* começa a desenrolar cabo de modo a tracionar o cabo principal que liga este ponto ao guincho principal. Deste modo é possível libertar e descolar o *Bridle Point* de forma suave.
- 6) Com o cabo auxiliar do *Bridle Point* frouxo, é desfeita a ligação entre o cabo e o guincho que o controla. A ponta do cabo auxiliar do *Bridle Point* é fixa no cabo principal e a fase de descolagem termina.

### **2.2.2 Fase de aterragem**

- 1) Através do guincho principal, é iniciada a recolha do cabo principal. Na fase de aterragem, a velocidade angular da plataforma imposta pelos motores é diminuída de modo a diminuir a força de sustentação criada pelo efeito de *Magnus*. A rotação da plataforma não é, inicialmente, completamente interrompida para assim auxiliar na estabilidade do movimento.
- 2) De seguida, um operador liga o cabo auxiliar do *Bridle Point* (quando este chega a uma altura possível de alcançar) ao guincho auxiliar correspondente.



- 3) É iniciada a recolha do cabo auxiliar do *Bridle Point* permitindo assim uma aterragem deste ponto numa zona perto da *Sheave*. De salientar que o guincho auxiliar, que ajuda esta aterragem, está assente numa estrutura móvel de modo a ser colocado numa zona livre de obstáculos.
- 4) Após a aterragem do *Bridle Point*, o guincho principal desenrola cabo possibilitando deste modo que o guincho do *Bridle Point* possa ser deslocado para a zona de aterragem da plataforma.
- 5) De seguida, é feita a ligação dos cabos auxiliares aos dois guinchos auxiliares por parte de um operador.
- 6) Interrompe-se a rotação da plataforma e inicia-se a recolha dos cabos auxiliares através do enrolamento nos guinchos. Nesta etapa o cabo principal está frouxo graças à ancoragem do *Bridle Point* ao solo.
- 7) Caso se pretenda, a plataforma pode ser forçada a alinhar um dos topos ao vento (diminuindo a área frontal exposta ao vento e consequentemente as forças aerodinâmicas), embatendo de seguida numa estrutura auxiliar de aterragem.
- 8) Independentemente da aterragem ser feita com um topo ou com a face lateral alinhada ao vento, todo o processo termina com a arrumação da plataforma e todos os componentes num local de armazenamento e segurança.

## 2.3 Tecnologias semelhantes

No que diz respeito a plataformas aéreas ancoradas, com objetivos idênticos e não só, outras empresas mundiais desenvolveram tecnologias semelhantes à da *Omnidea*. Com base nos seus objetivos, modos de funcionamento e princípios de sustentação/impulsão, estas tecnologias podem ser agrupadas em três diferentes grupos:

- *Blimps*;
- Planadores;
- Turbinas.

O grupo dos *Blimps* engloba os aeróstatos e plataformas mais leves que o ar ancoradas que tenham uma forma alongada e uma espécie de cauda de modo a reduzir a resistência do vento e a direcionar o balão. Um exemplo deste tipo de aeróstato é o usado pela *Lockheed Martin* num dos seus projetos.

A *Lockheed Martin* é possivelmente uma das empresa mais reconhecidas nesta indústria já que é a maior fabricante de equipamento militar do mundo.

No que se refere à tecnologia de plataformas mais leves que o ar, a empresa assume-se como sendo especialista há mais de 75 anos, sendo um dos seus projetos mais reconhecidos o *Tethered Aerostat Radar System* (TARS) que consiste num programa de vigilância terrestre que utiliza aeróstatos como plataformas de radares. Apesar de existirem vários modelos, o 420K (420000 *cubic feet* de volume (sensivelmente 12000 m<sup>3</sup>)) é o mais comum (Figura 2.9) e utilizado podendo este subir até altitudes de 4600 metros sendo usado como plataforma estacionária para radares de vigilância [12].

Atualmente o TARS é usado na monitorização da fronteira entre os Estados Unidos da América e o México, estreito da Florida e partes das Caraíbas auxiliando o Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América no combate ao tráfico de droga [12].



**Figura 2.9: Aeróstato 420K da empresa Lockheed Martin.**

Relativamente aos Planadores, estes são caracterizados como sendo aeronaves com uma configuração aerodinâmica semelhante a um avião e com asas de grande alongamento com o objetivo de minimizar o arrasto.

Como exemplos de planadores ancorados temos o projeto da *Makani Power* e da *Kitemill*. Ambas as empresas têm como principal objetivo a produção de energia limpa com base na energia do vento.

A *Makani Power*, neste momento, recorre ao seu modelo M600 (Figura 2.10). Com 26 metros de envergadura, este planador produz energia elétrica com base na rotação de oito rotores ligados cada um a um gerador. A rotação dos rotores dá-se graças ao voo em *loops* do planador quando este é sujeito a ventos cruzados. A força de sustentação garante que o sistema voa de forma autónoma e contínua. Segundo a empresa, o modelo M600 é capaz de gerar 600 kW [13].

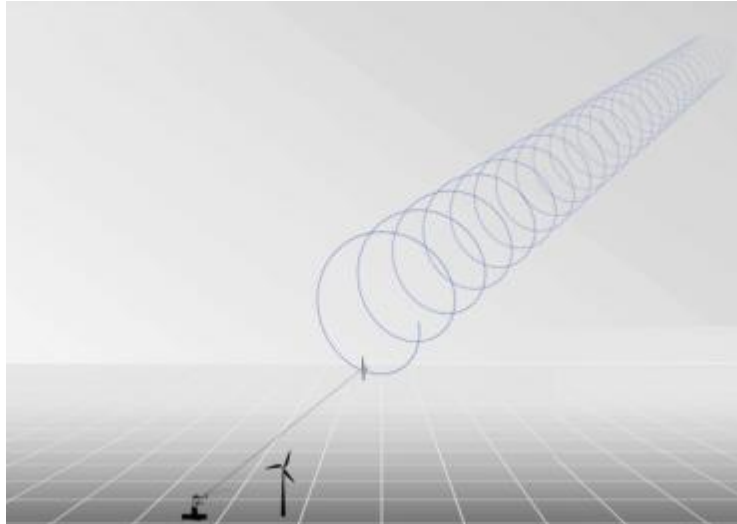


**Figura 2.10: Planador M600 da Makani Power.**

Já a *Kitemill* produz energia elétrica numa estação no solo. Com um princípio algo semelhante à *Makani Power*, o planador da *Kitemill* (Figura 2.11) voa em espirais afastando-se cada vez mais da sua base (Figura 2.12). Como a plataforma é ancorada, o cabo é tracionando e puxado conseguindo assim gerar energia elétrica. Quando o planador atinge uma altitude de sensivelmente 500 metros, é recolhido e todo o processo de geração de energia recomeça. A empresa estima que em 80% do tempo o sistema está a produzir energia, sendo os restantes 20% gastos na recolha do planador [14].



**Figura 2.11: Planador da empresa Kitemill.**



**Figura 2.12: Esquema do voo em espiral do planador durante a fase de produção de energia.**

No que diz respeito às plataformas ancoradas com turbinas, temos como exemplo a *Altaeros Energies* e a *Magenn* com o projeto *Magenn Air Rotor System* (MARS).

Neste grupo, é característico encontrar nas plataformas turbinas com o objetivo de produzir energia elétrica. Na verdade, a empresa *Makani Power*, referida anteriormente, poderia pertencer também a este grupo, porém, dada a geometria do sistema em si decidiu-se agrupar esta num grupo distinto.

O projeto da *Altaeros Energies* (Figura 2.13) passa por uma plataforma aérea com uma turbina eólica incorporada semelhante às turbinas eólicas convencionais. Para produzir energia, a plataforma aérea é colocada até 600 m do solo, onde os ventos são mais fortes e constantes. Deste modo é capaz de produzir o dobro da energia quando comparada com uma turbina eólica terrestre [15].



**Figura 2.13: Plataforma aérea da Altaeros Energies.**

Neste projeto toda a plataforma descola e aterra de forma completamente autónoma e automática numa estrutura movível sendo o sistema de cabos e guinchos bastante semelhante ao usado pela empresa *Omnidea* uma vez que também é recorrido a três guinchos para um cabo principal e dois cabos auxiliares (Figura 2.14).

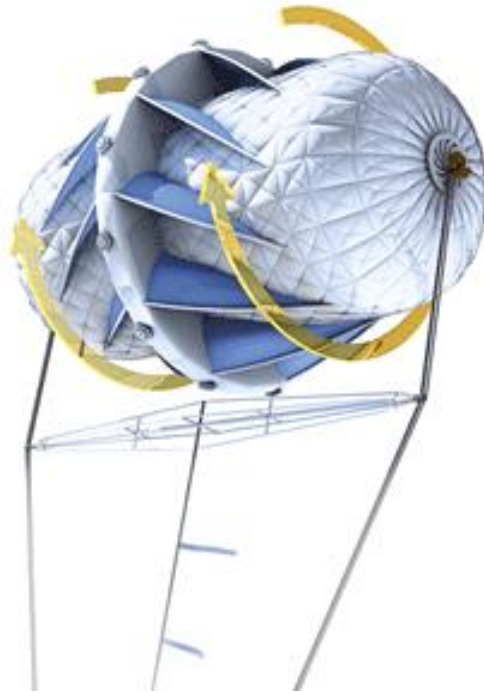


**Figura 2.14: Sistema de cabos e guinchos utilizado pela empresa *Altaeros Energies* (cabos auxiliares a azul e cabo principal a preto).**

Atualmente a empresa tenta implementar também serviços de telecomunicações em meios rurais através do mesmo princípio das plataformas aéreas.

No que toca ao projeto MARS, apesar de ser usado com fins distintos, este é o que mais se assemelha ao sistema construído pela *Omnidea*.

Partindo de uma plataforma mais leve que o ar insuflada com hélio, é produzida energia elétrica nos dois geradores colocados nos topos do balão. Esta energia é gerada através da rotação da plataforma em torno do seu eixo horizontal, esta que por sua vez é garantida pelo facto de na superfície do balão existirem pás que devido à força do vento obrigam a estrutura a girar (Figura 2.15).



**Figura 2.15: Plataforma aérea do projeto MARS.**

Devido ao facto de se tratar de uma plataforma ancorada com geometria semelhante a um cilindro, o facto desta rodar origina efeito de *Magnus* tal como no caso da plataforma da *Omnidea*. O papel do efeito de *Magnus* no projeto MARS é bastante importante já que ajuda a criar uma força de sustentação que não permite que a plataforma perca altitude ajudando também na sua estabilidade [16].

Um dado comum em todas as tecnologias mencionadas anteriormente é o facto das empresas recorrerem a estruturas que auxiliam os processos de descolagem e aterragem. Em alguns cenários, como no da *Lockheed Martin*, a plataforma aterra com a sua parte frontal alinhada com a direção do escoamento (vento). Este tipo de aterragem é bastante útil já que permite diminuir a força de arrasto aerodinâmico, facilitando deste modo o processo e tornando-o mais seguro. É possível visualizar a estrutura que garante a fixação da plataforma pela sua zona frontal na Figura 2.9 já apresentada anteriormente.

A aterragem com um dos topos alinhado ao vento da plataforma da *Omnidea* já foi estudada por parte da empresa, tendo inclusive já sido realizado o projeto de uma estrutura auxiliar para tornar possível e levar a cabo este método de aterragem [11]. Porém, para uma plataforma ancorada constituída por múltiplos balões, a estrutura já desenvolvida não pode ser utilizada uma vez que é impossível aterrar os vários balões constituintes da plataforma com os seus topos alinhados ao vento. Este processo levaria à torção e enrolamentos dos cabos da plataforma, metendo em causa os vários componentes do sistema.

Assim sendo, para o caso de uma plataforma composta por diversos balões, o processo de aterragem deverá ser levado com os balões ao comprido, ou seja, com as faces



laterais expostas ao vento. A estrutura a projetar terá de ser então semelhante a da *Makani Power*, onde são usadas duas bases onde a plataforma assenta. Esta estrutura é visível na Figura 2.10.

Outro exemplo de uma estrutura utilizada para a descolagem e aterragem de plataformas é o da empresa *Helikite* (Figura 2.16).



**Figura 2.16: Estrutura de aterragem e descolagem da empresa Helikite [17].**

Apesar das pequenas dimensões, a configuração da estrutura em forma de berço, é bastante útil para garantir uma aterragem segura e estável da plataforma. Outra característica relevante e a ter em conta é o facto da estrutura estar colocada num veículo permitindo assim que esta seja transportada para o local mais conveniente facilitando deste modo os processos de descolagem e aterragem. Esta característica é na verdade bastante comum e praticamente uma obrigação no que toca a estruturas de aterragem para plataformas aéreas ancoradas.





# 3

## Considerações e abordagem inicial do problema

Neste capítulo apresentam-se as considerações tomadas ao longo do projeto do sistema de descolagem e aterragem de uma plataforma composta por múltiplos balões. Estes requisitos foram impostos pela própria equipa de projeto servindo assim, de certa forma, como dados do problema. De modo a facilitar o projeto dos componentes necessários para garantir o acoplamento e desacoplamento dos balões à plataforma e todas as etapas da descolagem e aterragem, são referidas neste capítulo as principais diferenças entre o balão principal e os balões secundários que irão compor a plataforma aérea. São ainda salientadas neste capítulo algumas considerações acerca da estrutura auxiliar dos processos de descolagem e aterragem.

### 3.1 Considerações iniciais e fatores importantes para os processos de aterragem e descolagem

A equipa de projeto definiu que a plataforma aérea poderia ter entre dois a quatro balões, sendo que o aumento do número de balões que constituem a plataforma provoca, obviamente, processos de aterragem e descolagem mais demorados. Em relação ao material necessário, este é o mesmo independentemente do número de balões, ou seja, serão sempre utilizados os mesmos guinchos, pórticos e estrutura auxiliar.

A distância entre os eixos dos balões deverá rondar os 50 metros sendo um objetivo futuro aumentar este valor ainda mais. Dado a distância entre os aeróstatos ser elevada, é assumido que a rotação dos balões não afeta o escoamento em torno dos balões posicionados

imediatamente a baixo destes, não colocando deste modo em causa a correta rotação e formação da força de sustentação por efeito de *Magnus*. Independentemente do número de balões que constituem a plataforma, é requerido que os sistemas de acoplamento (três no total dado o facto de existirem três tipos/configurações de balões diferentes) e estrutura auxiliar dos processos de descolagem e aterragem funcionem e permitam a repetibilidade dos processos sem problemas.

Uma outra característica importante é o número de balões aos quais é imposta rotação para gerar força de sustentação pelo efeito de *Magnus*. Independentemente do número de balões da plataforma, o balão do topo terá sempre motores e rotação imposta. Para plataformas constituídas por dois, três ou quatro balões, poderá haver mais que um balão com rotação. O número de motores a instalar nos balões estará relacionado com os objetivos que a empresa queira atingir ou com a tarefa a realizar. Assim sendo, é novamente importante que os sistemas a projetar tenham em atenção estas considerações e se adaptem a cada cenário, já que as ligações dos cabos aos balões variam conforme estejamos perante um balão que tenha rotação ou não. Esta diferença deve-se ao facto dos balões que rodam disporem de um número adicionais de componentes, como por exemplo os motores, e dos próprios blocos onde é fixo o motor ser distinto do caso dos balões sem rotação.

Segundo a equipa de projeto, a plataforma aérea pode operar com rajadas de vento, no máximo, na ordem dos 18 m/s (65 km/h sensivelmente). Deste modo, todos os cálculos futuros que envolvam a velocidade do vento, como os cálculos das forças de arrasto e sustentação, serão realizados tendo em conta velocidades máximas de 18 m/s. Para os casos onde a plataforma não está a operar, como na descolagem e aterragem, serão consideradas velocidades, quer do vento quer angulares do balão, menores que as máximas permitidas, ou seja, os processos de descolagem e aterragem são realizados em períodos de vento constante e reduzido. É importante respeitar esta condição de modo a garantir processos mais seguros, não colocando assim os operadores e a própria plataforma em risco.

Em relação ao peso total da plataforma, sabe-se que, em qualquer dos cenários, isto é, independentemente do número de balões da plataforma, a empresa admite que o balão do topo poderá ter um peso total de até 150 kgf (envelope com 90 kgf e os restantes 60 kgf divididos pelos componentes dos dois topos). No que diz respeito aos balões secundários, estima-se que tenham o peso do envelope aproximadamente igual a 30 kgf e 40 kgf distribuídos pelos dois topos. Para combater o peso de cada balão, existe a força de impulsão devido ao facto de os balões serem insuflados com hélio. Esta força é de cerca de 190 kgf e 82 kgf para os casos do balão principal e balões secundários respetivamente.

O número de operadores envolvidos é também bastante importante, sendo estes necessários sobretudo para transportar os balões desde do local onde estão armazenados até ao local da descolagem/aterragem (6 operadores no mínimo), acoplar e desacoplar os cabos auxiliares e balões aos balões e cabos principais respetivamente (2 operadores no mínimo) e ligar e desfazer as ligações dos cabos auxiliares aos respetivos guinchos (2 operadores no

mínimo). Os mesmos operadores poderão estar encarregues de tarefas distintas já que estas são realizadas de forma praticamente independente e individual. A equipa de projeto estimou que entre a descolagem/aterragem de dois balões poderá haver um intervalo de 30 minutos.

É equacionado também o uso de uma plataforma de aterragem e descolagem com rolos. É pretendido que esta plataforma permita a aterragem e descolagem dos balões com estes já, ou ainda, em rotação, o que promove vantagens aos processos já que permite um melhor e maior controlo dos balões e da sua estabilidade. Plataformas com rolos semelhantes são utilizadas por várias empresas, por exemplo, no alinhamento e soldadura automática de tubos e reservatórios de pressão. Na Figura 3.1 está representado um exemplo da empresa *LJ Welding Automation*.



**Figura 3.1: Plataforma com rolos da empresa LJ Welding Automation [18].**

Inicialmente, numa primeira abordagem ao problema atual da empresa no que diz respeito aos processos de aterragem e descolagem de uma plataforma aérea de múltiplos balões, torna-se relevante identificar e detalhar as diferenças entre os balões que constituem a plataforma aérea uma vez que a composição do primeiro balão é sempre distinta da dos restantes. Identificando as diferenças existentes entre os balões, torna-se posteriormente mais simples encontrar soluções que resolvam as necessidades da empresa.

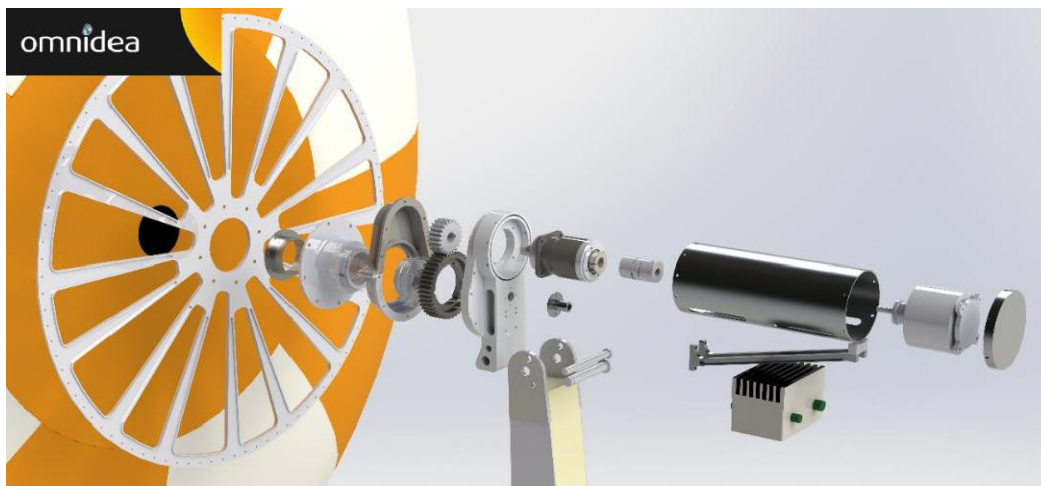
## 3.2 Balão do topo *Versus* restantes balões

Independentemente do número de balões que constituam a plataforma, o balão do topo será sempre distinto dos restantes uma vez que terá sempre rotação imposta, enquanto que nos demais isso nem sempre acontece.

Como já detalhado no subcapítulo 2.1.1 todos os balões apresentam geometrias cilíndricas sendo que os balões secundários têm sempre comprimento menor, ou no máximo igual, ao principal. As dimensões de ambos os balões são relevantes sobretudo para o projeto da estrutura auxiliar e para os processos de aterragem e descolagem. Diretamente dependentes das medidas dos balões estão também os valores das forças de arrasto e de sustentação (que influenciam os processos de aterragem e descolagem) tal como é possível verificar pela equação (1.1) e equação (1.2). Assim, o balão principal terá sempre uma força de sustentação superior à dos balões secundários, porém, em contra partida, a força de arrasto é superior também.

O primeiro balão é então aquele, como já referido, que tem um maior peso e sempre rotação imposta. O mecanismo que impõe a rotação ao balão é simétrico e idêntico nos dois topos, ou seja, cada balão (com rotação) terá os mesmos componentes, e em igual número, em ambos os topos.

A rotação é imposta graças aos motores elétricos. Através do fornecimento de energia através dos cabos elétricos, os motores fazem girar as duas jantes metálicas situadas nos topos do balão. Estas jantes têm 1 metro de diâmetro e estão solidárias com o balão uma vez que são ligadas à camada exterior de rede *Dyneema*. Ao rodar a jante, o balão é forçado também a rodar em torno do seu eixo longitudinal. Entre os motores e as jantes existem dois blocos por onde passa o sistema de engrenagens que promove a rotação do balão, sendo este protegido também pelo próprio bloco. Ligados a estes blocos existem ainda dois braços metálicos onde os cabos vindos do *Bridle Point* (no caso da plataforma atual da empresa) estão conectados. Uma vez conectados aos blocos por pinos, estes braços metálicos acabam por ficar fixos promovendo assim um momento contrário ao originado pelos motores e rotação do balão evitando assim o enrolamento dos cabos junto a este sistema de rotação e a fixação dos blocos. A equipa de projeto chama a estes braços metálicos bumerangues. Na Figura 3.2 estão esquematizados os vários componentes do sistema atual que impõe a rotação ao balão principal.



**Figura 3.2: Componentes do sistema de rotação do atual balão principal.**

Tanto as jantes metálicas com os bumerangues são comuns em todos os balões da plataforma, porém, estes últimos podem variar e ter geometrias distintas dependendo do balão onde serão instalados e caso se tratem do componente inferior ou superior do sistema de acoplamento. Estas diferenças serão clarificadas mais adiante no subcapítulo 6.2.

Em relação aos restantes balões, dependendo do facto de terem rotação imposta ou não, terão mais ou menos componentes.

Um balão secundário que tenha rotação terá obrigatoriamente de ter na sua constituição um motor, bloco e sistema de engrenagens semelhante ao balão do topo. Já o bumerangue terá de garantir não só que os cabos vindos do *Bridle Point*, ou balão inferior, são conectados ao bloco e aos motores do balão mas também que os mesmos cabos são encaminhados para o balão seguinte.

Os balões que não tenham rotação imposta não necessitaram obviamente de motores. Nos topos destes balões, para além das jantes, apenas existirão os bumerangues e um bloco mais simples onde é fixa uma peça de ligação que assegura o acoplamento do balão aos cabos principais e o encaminhamento destes para o balão acima.

Tendo por base as considerações iniciais do problema e as diferenças entre o balão principal e os balões secundários, é possível projetar possíveis sistemas que solucionem os problemas da empresa com o menor custo e riscos possíveis. No que toca aos processos de aterragem e descolagem, é relevante ter em consideração todas as possibilidades que solucionem o problema para que, através de uma comparação entre todas as hipóteses, se chegue à solução mais eficiente e eficaz.

No que diz respeito aos sistemas que asseguram o acoplamento dos balões aos cabos principais e plataforma, estes serão idênticos para qualquer uma das hipóteses de aterragem e descolagem. Deste modo, a projeção dos componentes de fixação pode ser realizada de um modo direto e sem necessidade de serem realizadas comparações com outros cenários.



# 4

## Soluções propostas e comparações

Neste capítulo são apresentadas hipóteses para solucionar o problema da descolagem e aterragem de uma plataforma ancorada constituída por múltiplos balões.

Ao longo do capítulo, são referidas as três principais soluções que, após várias considerações e raciocínios, mostraram ser as mais concretizáveis e plausíveis. Todas as características de cada uma das hipóteses serão referidas, detalhando também as principais vantagens e desvantagens de cada uma. Para cada um dos três cenários, os processos de descolagem e aterragem serão também apresentados passo a passo (em anexo). Com base nestes fatores, é feita ainda uma comparação entre as várias hipóteses de modo a chegar à solução mais vantajosa e que vá de encontro aos requisitos da empresa.

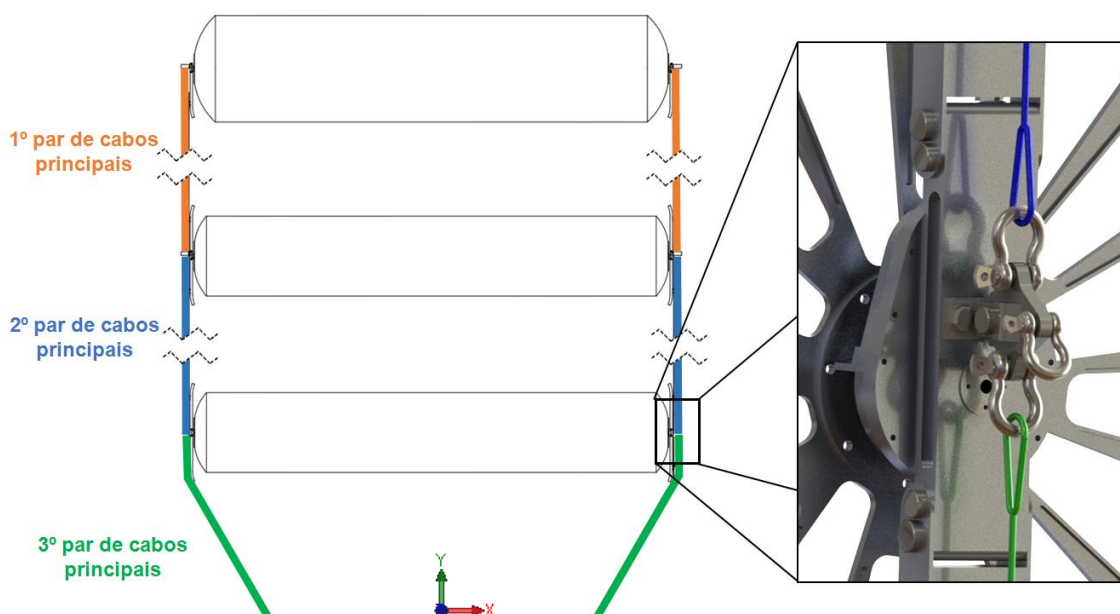
As três principais soluções são então:

Hipótese 1: Utilização de dois guinchos principais e dois cabos principais permitindo que os cabos fiquem sempre paralelos e que o acoplamento e o desacoplamento dos balões seja realizado de forma individual;

Hipótese 2: A plataforma aérea é tratada como uma só, sendo os balões secundários descolados e aterrados em simultâneo e acoplados e desacoplados antes e depois dos processos de descolagem e aterragem respetivamente;

Hipótese 3: Manter a disposição semelhante à atual, com acoplamento e desacoplamento dos balões individualmente, recorrendo a guinchos auxiliares mais potentes e a uma estrutura auxiliar.

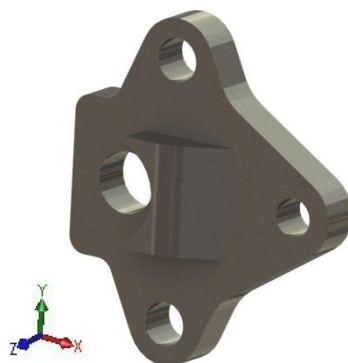
Uma característica comum aos três cenários é o facto dos cabos principais, com função estrutural, deixarem de ser contínuos desde do *Bridle Point* até ao balão principal como no sistema atual de uma plataforma constituída por apenas um balão. Trabalhando agora com uma plataforma composta por múltiplos balões, os cabos principais de *Dyneema* passam a ser vários e divididos entre os balões. A cada topo do balão estão ligados dois cabos (um que ligará no balão superior e um vindo do balão inferior ou *Bridle Point*) como é possível observar na Figura 4.1.



**Figura 4.1: Ligação dos vários pares de cabos principais da plataforma e detalhe do caso de um balão secundário sem rotação imposta.**

Também pela Figura 4.1, identifica-se através das cores ilustrativas, que irão existir tantos pares de cabos principais como o número de balões que constituam a plataforma.

Os vários cabos estão ligados a manilhas que por sua vez, através de peças de ligação, são fixas na zona dos blocos dos vários balões. Na Figura 4.2 é possível visualizar uma das peças de ligação que é fixa aos blocos dos balões.



**Figura 4.2: Exemplo de uma das peças de ligação onde são fixos os cabos principais através de manilhas.**



Posteriormente, nesta dissertação, será detalhado o raciocínio levado e as características tidas em consideração no projeto das peças de ligação e na escolha das manilhas que são utilizadas. Com estes componentes de fixação é possível garantir a continuidade dos cabos principais e a ligação entre os vários balões.

Este sistema porém vai contra a primeira ideia da empresa que foi ter apenas dois cabos principais passantes desde do *Bridle Point* até ao balão principal onde seriam acoplados todos os balões. Inicialmente, para este cenário, foi pensado utilizar componentes como *cable glands* ou *cord grips* com rede como os da Figura 4.3 que teriam de ser previamente colocados nos cabos ficando deste modo solidários com estes. Estes elementos iriam depois ser fixos a uma peça de ligação com as mesmas funções da peça da Figura 4.2 permitindo deste modo acoplar os balões aos cabos principais.



**Figura 4.3: Componentes inicialmente propostos a utilizar; (a) Cable gland; (b) Cord grip com rede de aço inoxidável [19].**

Dado o facto dos *cable glands* e *cord grips* serem utilizados com funções distintas das requeridas neste projeto (funções destes componentes são essencialmente servir como vedante e distribuir tensões evitando danos nos cabos), o recurso a estes elementos poderia levar a possíveis falhas, como por exemplo o eventual deslizamento dos componentes nos cabos ou até mesmo a sua rutura, dado ao facto de terem uma pequena área de resistência à tração e não serem peças indicadas para trabalhar com cargas tão elevadas como é o caso. Deste modo, o perfeito acoplamento dos balões e correta funcionalidade de todo o sistema não poderia ser garantida com toda a certeza.

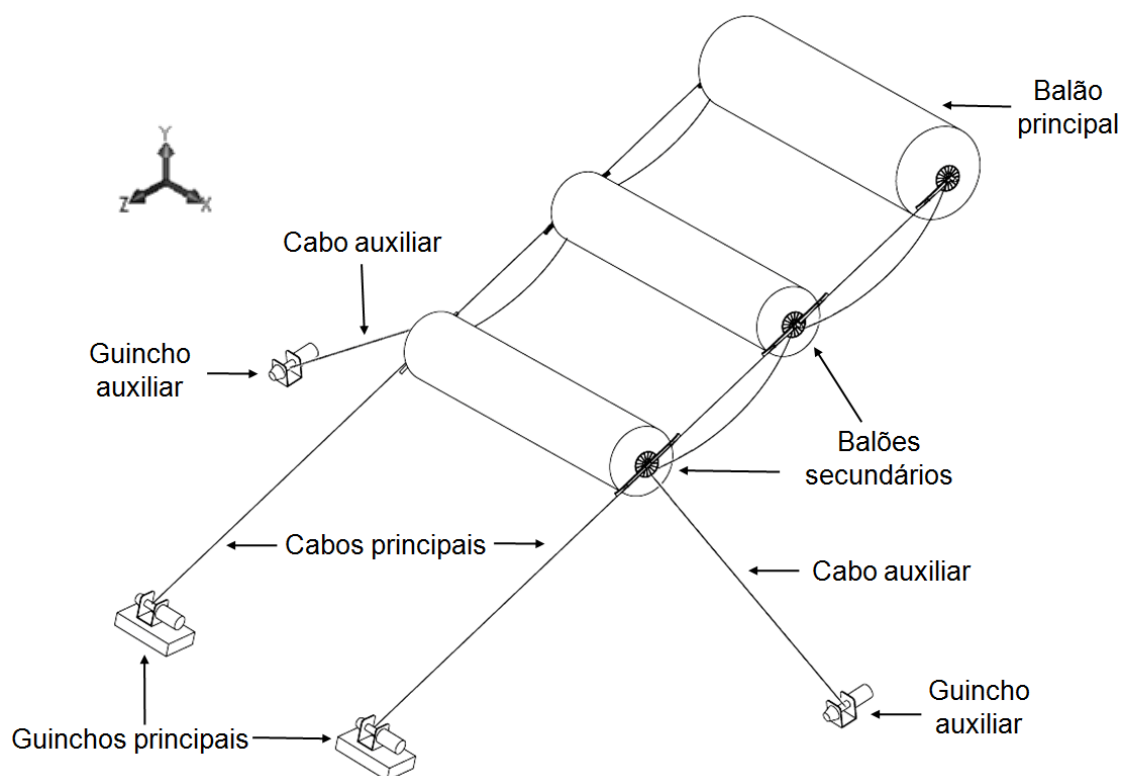
A solução encontrada foi então, como já referido, utilizar vários pares de cabos principais ligados ao longo dos balões tornando assim possível e simples o acoplamento e desacoplamento dos balões secundários aos cabos principais.

Este sistema é comum em todas as soluções apresentadas nesta dissertação. Nos seguintes subcapítulos são detalhadas cada uma das três hipóteses sendo ainda apresentado no anexo A todas as etapas detalhadas dos processos de descolagem e aterragem de cada uma das soluções propostas.

## 4.1 Hipótese 1: Dois guinchos principais e cabos principais paralelos

Nesta hipótese é recorrido a dois guinchos principais que permitem que os cabos principais fiquem paralelos entre si com uma distância igual à do comprimento dos balões.

No que diz respeito aos cabos auxiliares, cada balão tem dois cabos, cada um num topo, sendo recorrido, tal como é feito atualmente, aos guinchos auxiliares nos processos de descolagem e aterragem. Neste cenário cada balão fica tracionado por 4 cabos permitindo o seu desacoplamento da plataforma (Figura 4.4).

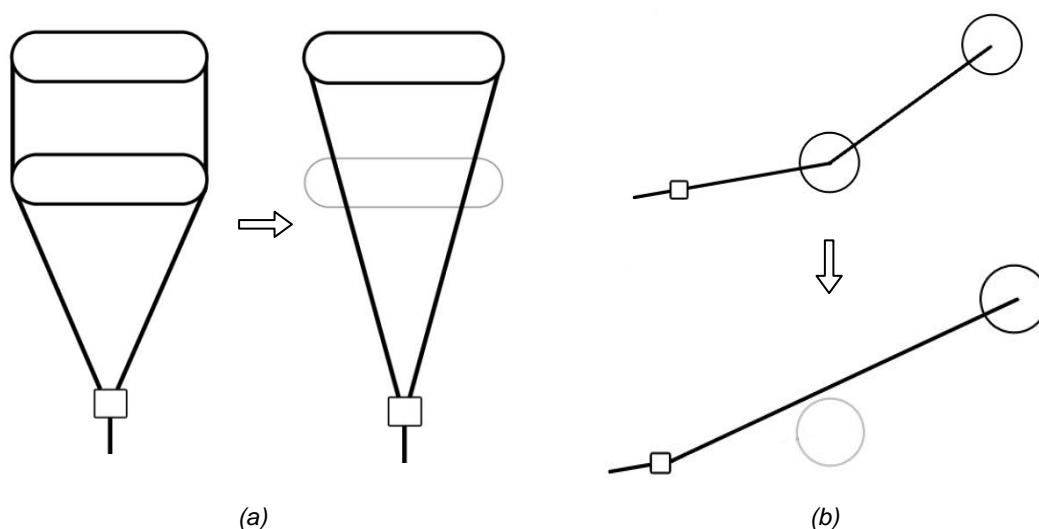


**Figura 4.4: Esquema do processo de aterragem levado na hipótese 1.**

Na descolagem, o acoplamento dos balões é facilitado pela tração dos cabos por parte do balão principal já em rotação e pelo facto dos cabos já estarem devidamente espaçados graças aos dois guinchos principais.

Na aterragem, os balões podem ser continuamente puxados e aproximados do solo uma vez que não existe *Bridle Point* (a ausência deste ponto específico é porém também uma desvantagem). Os guinchos auxiliares a utilizar podem ser os atuais que a empresa dispõe dado que os principais esforços e forças na recolha dos balões são realizados pelos dois guinchos principais, sendo que a função dos guinchos auxiliares, como o nome indica, é apenas para auxiliar os processos de aterragem e descolagem. Os cabos auxiliares são ainda importantes para evitar a subida e o fecho dos cabos principais (no caso da hipótese 1 é apenas subida devido ao facto dos cabos principais estarem sempre paralelos) aquando do

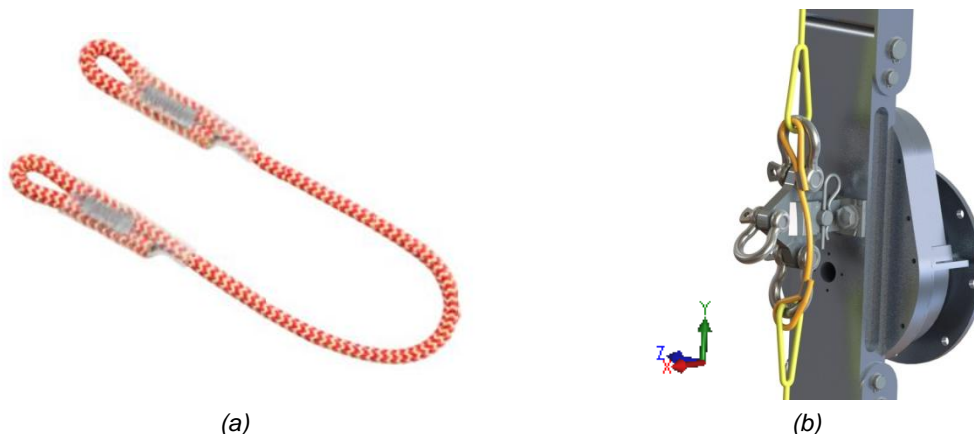
desacoplamento de um balão da plataforma (Figura 4.5). Este é de resto um problema comum e a evitar em todas as hipóteses de modo a impedir puxões que possam originar problemas tanto nos balões como nos próprios cabos.



**Figura 4.5: Problemas associados ao desacoplamento dos balões da plataforma; (a) Fecho dos cabos (vista de frente); (b) Subida dos cabos (vista lateral).**

O principal problema da solução 1 é o facto das peças de ligação não poderem ser enroladas nos tambores dos guinchos principais. Assim sendo, é necessário que as peças de ligação sejam montadas e desmontadas nos cabos principais ao longo dos processos de descolagem e aterragem respetivamente.

Sendo uma das funções das peças de ligação garantir a continuidade dos cabos principais, quando estas peças não fazem parte do sistema, ou seja, ainda não foram montadas ou já foram removidas, é necessário continuar a garantir a ligação entre os cabos. Uma solução é adicionar um cabo curto com dois *loops* ligados nas extremidades dos dois cabos principais e de seguida cozidos tal como representado na Figura 4.6a. Este cabo adicional fará sempre parte do sistema mesmo quando a peça de ligação também esteja acoplada. O acoplamento desta peça é feito pela passagem das duas maninhas nos *loops* dos cabos principais (Figura 4.6b).



**Figura 4.6: Solução para garantir a continuidade dos cabos principais; (a) Representação do cabo auxiliar adicional; (b) Modo como este se dispõe no sistema.**

Estaremos perante um sistema redundante uma vez que, tanto a peça de ligação como o cabo adicional garantem a continuidade dos cabos principais, porém, a peça de ligação permite a fixação dos cabos ao bloco e assim acoplar o balão à plataforma, ou seja, os cabos adicionais apenas serão realmente utilizados quando as peças de ligação, tal como já foi referido, não façam parte do sistema, como nos cenários onde é realizado o enrolamento e desenrolamento dos cabos principais nos tambores dos guinchos principais.

A juntar à desvantagem da necessidade de um cabo adicional, outros pontos fracos desta hipótese são:

- A necessidade de dois guinchos principais;
- O *Bridle Point* (como existe atualmente) deixa de existir não sendo possível assim colocar e utilizar, pelo menos da mesma maneira, todos os equipamentos que atualmente a empresa têm neste ponto;
- A localização do *Bridle Point* teria de passar para um dos balões, podendo influenciar negativamente todo o sistema;
- O sistema é bastante diferente quando comparado com o atual utilizado pela empresa;
- É necessário um rigoroso sincronismo entre os guinchos principais para os processos de aterragem e descolagem serem realizados sem problemas;
- O aumento do peso do sistema devido à existência de dois cabos principais;
- A solução encontrada para garantir a continuidade dos cabos principais depois de removidas as peças de ligação promove um enrolamento longe de ser perfeito, adequado e correto, levando deste modo a um grande desgaste dos cabos e do próprio guincho.

Por outro lado, alguns dos pontos fortes da hipótese 1 são:

- O aumento da facilidade na recolha dos cabos principais devido a estes serem paralelos e à inexistência do *Bridle Point*;
- Os problemas associados ao fecho dos cabos diminuem já que estes são sempre paralelos entre si (cabos apenas sobem quando desacoplado um balão);
- Os processos de descolagem e aterragem de forma geral mais simples;
- Os esforços principais e as forças na recolha dos balões são realizados pelos guinchos principais.

Nesta hipótese poderá ser equacionado ainda o uso de calhas que sirvam como constrangimentos para os cabos principais forçando estes a tomarem posições que possam ser convenientes. Estas calhas poderão ser úteis sobretudo para evitar que os cabos principais subam em demasia, dificultando o desacoplamento dos balões no processo de aterragem.

O uso de uma estrutura auxiliar dos processos de descolagem e aterragem, semelhante à que será apresentada e utilizada na hipótese 3, pode também ser equacionado.

## **4.2 Hipótese 2: Plataforma tratada como uma só com descolagem e aterragem simultânea de balões**

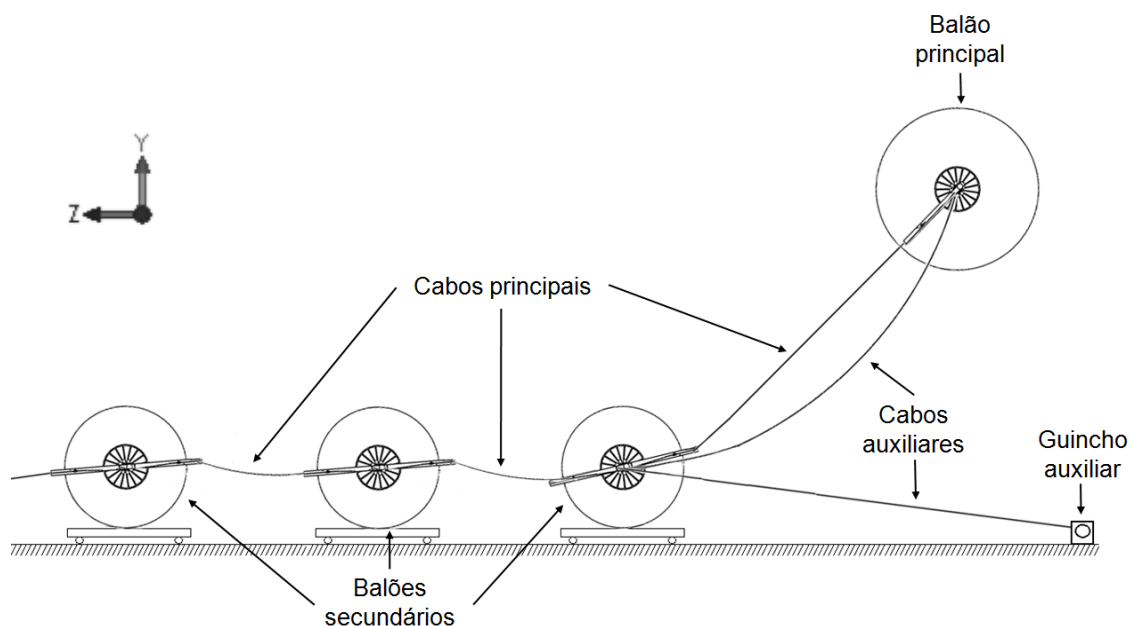
No caso da hipótese 2, deixa de ser necessário dois guinchos principais bastando apenas o existente que é utilizado atualmente pela empresa. Já os guinchos auxiliares, continuarão a ser dois, mas terão de ser obrigatoriamente distintos dos atuais devido à necessidade de uma maior capacidade de armazenamento de cabo no tambor do guincho e maior potência para recolher e segurar os balões da plataforma.

Apesar do sistema ser bastante idêntico com o atual, uma das maiores diferenças quando comparado com as restantes hipóteses é o número de cabos auxiliares que, no caso desta solução são, ao todo, quatro. Os quatro cabos auxiliares serão, independentemente do número de balões que constituam a plataforma, igualmente distribuídos pelo balão principal e pelo primeiro balão secundário a contar do topo, ou seja, o balão secundário imediatamente a baixo do balão principal. No máximo, quando a plataforma é composta por quatro balões, os dois mais abaixo não terão cabos auxiliares.

Todavia, a característica mais relevante da hipótese 2 é o facto dos vários balões já estarem, antes do processo de descolagem, acoplados à plataforma. Deste modo, é possível pensar na plataforma, antes e depois dos processos de descolagem e aterragem respetivamente, como um sistema só e “produto final” uma vez que não são realizadas mais ligações e operações de acoplamento ou desacoplamento de balões. O facto de não ser necessário realizar estas mesmas operações no terreno e já, ou ainda, com a plataforma em suspensão permite que os processos de aterragem e descolagem possam ser mais rápidos e práticos.

No processo de descolagem, o balão principal sobe individualmente com o auxílio dos cabos auxiliares sendo que os restantes descolam simultaneamente com o auxílio não só dos cabos auxiliares mas também do balão principal que, já em suspensão e rotação, traciona os cabos principais.

Na aterragem, são acoplados aos guinchos auxiliares os cabos auxiliares do segundo balão a contar do topo sendo de seguida puxados, fazendo com que o balão secundário se aproxime do solo. Os balões secundários abaixo deste acabam também por forçadamente baixar. Como o comprimento dos cabos entre balões é sempre igual e conhecido, é possível determinar onde os balões irão aterrar, permitindo posicionar os vários carrinhos. Mal os balões estejam posicionados por cima dos carrinhos, são amarrados com cintas colocadas à sua volta por operadores podendo deste modo serem transportados e armazenados. Na Figura 4.7 está representado um esquema do processo de aterragem desta hipótese.



**Figura 4.7: Esquema do processo de aterragem levado na hipótese 2.**

Importante notar na Figura 4.7 que os guinchos auxiliares estão colocados para lá do balão a puxar, isto é, os cabos auxiliares quando puxados pelos respectivos guinchos são tracionados (e tracionam os cabos principais) no sentido contrário àquele que o guincho principal puxa o cabo principal. Este fator é bastante relevante uma vez que é assim que é garantido que todos os balões descem e aterram simultaneamente sem problemas. Caso os guinchos auxiliares estivessem colocados antes do balão secundário, ou seja, à esquerda do balão ao qual estão ligados os cabos auxiliares, ao recorrer os cabos auxiliares, os homólogos principais não seriam tracionados e poderia ocorrer o embate do balão com os restantes balões secundários já que não haveria a certeza que os restantes balões fossem também recolhidos.

No que toca à aterragem do balão principal, uma vez que os balões secundários não são desacoplados dos cabos principais e plataforma, é dificultada a aterragem do balão principal com um dos topos alinhado ao vento. No caso desta hipótese é recomendado que a aterragem do balão do topo seja feita da forma tradicional, isto é, com a face lateral exposta ao vento e com o auxílio dos dois guinchos auxiliares.

Nesta hipótese, a juntar aos cabos auxiliares já utilizados é necessário dois outros cabos auxiliares extras com função de segurar a plataforma de modo a permitir a troca de cabos auxiliares nos respectivos guinchos durante os processos de descolagem e aterragem. Estes cabos auxiliares extras estarão ligados a peças de ligação fixas nas partes inferiores dos bumeranges do primeiro balão secundário a contar do topo. O prender da plataforma através destes cabos é possível graças aos *cable grips* ligados às peças de ligação. Este recurso a cabos auxiliares extras é comum na hipótese 3 mas não é necessário na já apresentada hipótese 1.

Apesar de, à partida, esta solução parecer simplificar os processos de descolagem e aterragem da plataforma, esta apresenta diversas desvantagens como por exemplo:

- O comprimento do cabo auxiliar é bastante elevado sendo no máximo igual a 180 metros (60 metros multiplicado por três);
- Devido ao facto de se trabalhar com a plataforma como sendo um sistema só, implica um maior número de operadores devido à descolagem e aterragem simultânea dos vários balões;
- Não é possível acoplar ou desacoplar apenas um balão sem se aterrar o sistema completo;
- Quando os balões estão no solo, o primeiro balão no qual o vento embate faz variar o escoamento em torno dos restantes dificultando os processos de descolagem e aterragem simultânea dos balões. A aterragem é também dificultada pela turbulência dos balões perto do solo;
- São necessários vários carrinhos de transporte (2 por cada balão);
- Os guinchos auxiliares existentes teriam de ser substituídos já que o tambor não tem capacidade para armazenar mais que 60 metros de cabo. Além disso, para uma plataforma constituída por vários balões, a potência necessária dos guinchos aumenta também sendo este outro fator a ter em conta;
- Não é possível aterrar o balão principal com um dos topos alinhados ao vento;
- Como não é utilizada uma estrutura auxiliar extra como a da hipótese 3, o correto uso e desempenhar de funções dos cabos auxiliares extra é dificultado.

As vantagens desta solução resumem-se às seguintes:

- Não há necessidade de acoplar/desacoplar os balões aos cabos principais e plataforma (estes processos são levados no solo de forma segura) o que simplifica os processos de descolagem e aterragem;
- Peças de ligação não necessitam de ser retiradas dos cabos principais;
- Localização do *Bridle Point* idêntica à atual.

### **4.3 Hipótese 3: Acoplamento e desacoplamento individual dos balões recorrendo a uma estrutura auxiliar**

Na terceira solução é proposto o acoplamento e desacoplamento individual dos vários balões ao longo dos processos de descolagem e aterragem respetivamente. Neste cenário é utilizado um sistema bastante semelhante com o atual da *Omnidea* recorrendo apenas a um guincho principal, dois auxiliares e dois cabos auxiliares por balão. A localização do *Bridle Point* continua inalterável sendo no ponto onde o cabo principal se divide nos cabos principais

estruturais e elétricos. Deste modo, tudo o que a empresa desenvolveu para este ponto, no que diz respeito a componentes e sistemas, pode continuar a ser utilizado.

Uma das características mais importantes nesta hipótese são os guinchos auxiliares utilizados nos processos de descolagem e aterragem. Como já referido, é recorrido a dois guinchos auxiliares como atualmente, porém, para este cenário, os guinchos necessitam de ter uma maior potência. Esta necessidade prende-se com o facto do guincho principal apenas recolher o cabo principal sendo que, depois de aterrar o *Bridle Point* no solo, torna-se impossível a recolha dos cabos estruturais principais (que ligam os balões ao *Bridle Point*) e assim baixar os balões. Dado este cenário, os guinchos auxiliares passam então a ser os componentes mais relevantes para o processo de aterragem da plataforma já que são eles que exercem as forças que permitem o manuseamento e recolha dos balões. Devido ao facto da plataforma ser constituída por múltiplos balões, é necessário que os guinchos auxiliar tenham capacidade de gerar uma força de elevação superior à exercida pelos guinchos atuais uma vez que estes apenas trabalham com um sistema constituído por um único balão. À medida que se aumenta o número de balões da plataforma, aumentam, também, as forças aerodinâmicas que atuam sobre esta, obrigando aos guinchos auxiliares a exercerem forças de tração mais elevadas também. Com isto é garantido que os balões sobem e descolam de forma suave, não prejudicando os cabos e os restantes componentes do sistema.

Nesta solução é utilizado também uma estrutura que auxilia os processos de descolagem e sobretudo aterragem.

Esta estrutura será composta por dois berços que servirão como base onde os balões irão pousar no caso dos processos de aterragem. A distância entre o ponto mais baixo destas bases semicirculares até ao solo será sensivelmente de 2 metros, sendo estas bases compostas por múltiplos rolos que irão rodar pelo atrito causado pelo contacto com os balões. Estes rolos irão permitir assim que os balões possam aterrar ainda em rotação, o que promove uma melhor estabilidade e controlo do processo tornando-o assim mais seguro. Apesar de ser sobretudo pensada para o uso no processo de aterragem, a estrutura auxiliar pode também ser utilizada na fase de descolagem, permitindo que os balões estejam em rotação no momento em que são largados e descolam.

Relativamente ao processo de descolagem da plataforma, já depois de descolar o balão principal com recurso aos cabos auxiliares, é necessário a abertura manual dos cabos principais de modo a ser possível acoplar os balões secundários. Este processo é possível de ser levado sem grandes esforço devido ao facto dos cabos principais estarem frouxos e pousados no chão.

À semelhança da hipótese 2, nesta solução são necessários também cabos auxiliares extras de modo a segurar a plataforma para ser possível levar a cabo a troca dos cabos auxiliares nos respetivos guinchos. Estes cabos auxiliares extras são necessários em ambos os processos de descolagem e aterragem, estando, ao não serem utilizados, devidamente



enrolados e fixados à peça de ligação da parte inferior dos bumerangues dos balões secundários. O balão do topo é o único que não necessita de cabos auxiliares extras.

Na aterragem, antes de aterrar o primeiro balão secundário, tem de ser colocada no local de aterragem a estrutura auxiliar. A correta posição da estrutura na pista é bastante importante já que é necessário evitar embates incorretos por parte dos balões com as bases que os irão suportar. A distância ideal até aos pórticos e a melhor posição da estrutura são possíveis de determinar como será visto mais em diante na dissertação.

Uma vez com o balão pousado na estrutura, este é constrangido pelas bases em forma de berço e pelas cintas que são colocadas à sua volta podendo assim ser desacoplado da plataforma por parte de dois operadores com o auxílio de escadotes. Uma vez desacoplados, os balões são transportados para o local de armazenamento.

De modo a libertar a estrutura auxiliar para recolher um novo balão, o balão anteriormente desacoplado tem de ser retirado do topo desta. Para realizar este processo são ligados dois cabos auxiliares ao bloco do balão com o auxílio de duas cavilhas e troços de mola beta no local onde estava fixa a peça de ligação. As cavilhas e troços de mola beta utilizados podem ser os mesmos que anteriormente foram guardados aquando do desacoplamento do balão da plataforma. Com os cabos acoplados, as cintas que constroem o balão são removidas e este sobe devido à força de impulsão criada pelo hélio. Ao subir, o balão deixa de estar assente na estrutura podendo ser movido e puxado pelos operadores para o solo sem grande esforço devido à pequena diferença entre as forças de impulsão e peso dos balões. Com a estrutura livre, esta é levada de novo para o local de aterragem de modo a receber um novo balão. Uma outra hipótese para deixar a estrutura auxiliar livre passa pelo esvaziar dos balões com estes ainda no topo da estrutura. Uma vez vazios, os envelopes dos balões são facilmente retirados da estrutura e guardados. No caso da estrutura ser utilizada no processo de descolagem, para colocar os balões no topo desta, é recorrida igualmente a uma das hipóteses referidas, ou seja, colocação de forma manual dos balões ou o enchimento do envelope com este já colocado no topo da estrutura.

A estrutura auxiliar dos processos de aterragem e descolagem apresenta-se então como sendo a principal característica da hipótese 3, porém, apesar de ser bastante útil para os processos, terá de ser considerada como uma desvantagem desta solução devido ao facto de implicar o seu projeto e estudo uma vez que a empresa não dispõe de uma estrutura semelhante.

Outras desvantagens desta solução são as seguintes:

- Armazenamento dos cabos principais no solo ao longo dos processos de aterragem e descolagem;
- Envolve bastantes operadores e componentes extras (escadotes, estrutura auxiliar, cabos auxiliares extras, etc.);

- Os guinchos auxiliares são os componentes que exercem as forças para recolher e libertar os balões de forma suave, implicando assim a substituição dos guinchos atuais por uns mais potentes.

Em relação aos pontos fortes desta hipótese, temos como exemplo:

- As peças de ligação não necessitam de ser retiradas dos cabos principais;
- A disposição e a utilização de equipamentos semelhantes ao atual, não implicando mudanças drásticas ao sistema da empresa;
- A localização do *Bridle Point* é idêntica à atual;
- Não há necessidade de calhas e guias para forçar posições convenientes dos cabos principais;
- É possível acoplar e desacoplar apenas um balão quando necessário sem ter de aterrar toda a plataforma;
- Uma vez com a estrutura auxiliar produzida, esta facilita e torna mais seguro os processos de descolagem e aterragem.

## 4.4 Comparação das várias hipóteses

De modo a decidir qual a melhor solução para a empresa das três apresentadas neste capítulo foi feita uma comparação entre estas com base em diversos fatores considerados relevantes. Na Tabela 4.1 está sumariada esta comparação.

**Tabela 4.1: Comparação entre as três hipóteses.**

	Hipótese		
	1	2	3
<b>Fatores relevantes</b>	<b>Dois guinchos principais e cabos principais paralelos</b>	<b>Plataforma tratada como uma só com descolagem e aterragem simultânea de balões</b>	<b>Acoplamento e desacoplamento individual dos balões recorrendo a uma estrutura auxiliar</b>
<b>Acoplamento dos balões</b>	Um a um e com (pelo menos) o balão principal já em voo	No solo antes do processo de descolagem	Um a um e com (pelo menos) o balão principal já em voo
<b>Desacoplamento dos balões</b>	Um a um e com (pelo menos) o balão principal ainda em voo	No solo depois do processo de aterragem	Um a um e com (pelo menos) o balão principal ainda em voo
<b>Método de transporte da plataforma</b>	Um par de carrinhos ou estrutura auxiliar idêntica à da hipótese 3	Tantos pares de carrinhos como o número de balões	Estrutura auxiliar
<b>Problemas associados ao fecho dos cabos</b>	Sim, cabos sobem (mas possível de evitar)	Não	Sim, cabos sobem e fecham (mas possível de evitar)
<b>Possibilidade de alterar o sistema</b>	Sim, a qualquer altura (com velocidades de vento baixas)	Somente se a plataforma aterrar	Sim, a qualquer altura (com velocidades de vento baixas)

<b>Tempo disponível para acoplar e desacoplar os balões</b>	Mais controlado devido a ser no terreno	O necessário uma vez que os processos são levados com a plataforma não estando em funcionamento	Mais controlado devido a ser no terreno
<b>Possibilidade de aterrar os balões com um dos topos alinhado ao vento</b>	Sim, o último balão	Não	Sim, o último balão
<b>Tempo de descolagem e aterragem</b>	Mais demorado que (2)	Hipótese com processos mais rápidos	Mais demorado que (2) (30 minutos entre cada balão)
<b>Tempo necessário para preparar a plataforma e estruturas</b>	Não precisa de muito tempo de preparação	Hipótese com preparação mais demorada devido ao acoplamento inicial de todos os balões	Idêntico a (1) com o acréscimo do tempo necessário na montagem da estrutura auxiliar de aterragem
<b>Número de guinchos</b>	2 principais e 2 auxiliares	1 principal e 2 auxiliares com mais potência que os atuais	1 principal e 2 auxiliares com mais potência que os atuais
<b>Necessário estrutura auxiliar de aterragem</b>	Não mas caso se decida utilizar, é necessário uma	Não mas caso se decida utilizar, serão necessárias tantas estruturas como o número de balões (não recomendado)	Sim, uma
<b>Acoplamentos iniciais dos bumerangues e peças de ligação</b>	Cabos principais desde início acoplados nas peças de ligação. Bumerangues desde início fixos aos blocos dos balões	Balões desde início acoplados aos cabos principais, ou seja, as peças de ligação estão desde início fixas aos blocos	Cabos principais desde início acoplados nas peças de ligação. Bumerangues desde início fixos aos blocos dos balões
<b>Cabos auxiliares</b>	2 por cada balão	2 Cabos auxiliares para o balão principal e 4 cabos (2 auxiliares e 2 auxiliares extra) para o primeiro balão secundário a contar do topo	2 Cabos auxiliares para o balão principal e 4 por cada balão secundário (2 auxiliares e 2 auxiliares extra)
<b>Tamanho dos cabos auxiliares</b>	Todos idênticos com comprimento igual a 60 metros	Cabos auxiliares do balão principal (secundário) idênticos e com comprimento igual a 60 (180) metros. Cabos auxiliares extras todos idênticos com comprimento igual a 3,2 metros	Cabos auxiliares todos idênticos com comprimento igual a 60 metros. Cabos auxiliares extras todos idênticos com comprimento igual a 3,2 metros
<b>Número de operadores</b>	Envolve menos operadores que (2)	Necessários vários operadores por balão devido à aterragem simultânea destes	Envolve menos operadores que (2)
<b>Semelhanças com sistema atual</b>	Bastante diferente devido aos dois guinchos principais	Componentes semelhantes com a adição de guinchos mais potentes	Componentes semelhantes com a adição de guinchos mais potentes e uma estrutura auxiliar
<b>Bridle point</b>	Componentes terão de ser colocados num balão	Idêntico ao atual	Idêntico ao atual
<b>Força que liberta e recolhe os balões durante os processos</b>	Força é feita, essencialmente, pelos 2 guinchos principais	Força é feita pelos 2 guinchos auxiliares	Força é feita pelos 2 guinchos auxiliares

Depois de apresentar os vários cenários à equipa de projeto e analisando a Tabela 4.1 assim como todas as características e etapas dos processos de descolagem e aterragem de cada uma das hipóteses apresentadas, concluiu-se que a solução mais vantajosa para a empresa é a hipótese 3 onde é feito o acoplamento e desacoplamento individual dos vários balões que constituem a plataforma e se recorre a uma estrutura auxiliar para facilitar os processos de descolagem e sobretudo aterragem.

A escolha desta hipótese é justificada pelas vantagens que esta apresenta face às restantes soluções, como por exemplo, o acoplar e desacoplar individual dos balões da plataforma, a não necessidade da remoção das peças de ligação dos cabos principais (como os cabos não são enrolados na hipótese 3, as peças não precisam de ser removidas) e a diminuição do peso do sistema devido à necessidade de apenas um cabo principal. O facto de ser necessário o projeto de uma estrutura auxiliar dos processos de descolagem e aterragem não se apresenta como um ponto fraco relevante já que a própria empresa mostrou interesse neste projeto tendo sido este aspeto debatido e equacionado desde início.

Nos capítulos seguintes será apresentado todo o raciocínio levado para o cálculo dos ângulos de equilíbrio e forças aerodinâmicas que atuam nos balões da plataforma. Com base nesses valores, todos os componentes necessários para garantir o acoplamento dos balões aos cabos e plataforma poderão ser projetados de modo a garantir a segurança e o correto funcionamento do sistema. Posteriormente, será apresentado também o raciocínio levado no projeto da estrutura auxiliar de modo a ser possível implementar e por em prática a solução escolhida como a mais vantajosa e preferível para a *Omnidea*.

# 5

## **Cálculo das forças aerodinâmicas e seleção de novos guinchos auxiliares**

Neste capítulo são apresentados os cálculos das componentes de arrasto e sustentação das forças aerodinâmicas que atuam nos vários balões que constituem a plataforma assim como os seus ângulos de equilíbrio. O cálculo destas forças e ângulos é de extrema importância já que é através dos valores obtidos que se torna possível o projeto das peças e componentes necessários para garantir o acoplamento dos balões à plataforma e da estrutura auxiliar dos processos de descolagem e aterragem. Através destes mesmos cálculos é também possível determinar as forças que são necessárias realizar para recolher e baixar os balões. Tendo por base esses valores, serão escolhidos novos guinchos auxiliares que garantam a descolagem e aterragem de uma plataforma constituída por múltiplos balões sem qualquer problema, tornando possível a implementação da solução escolhida como mais vantajosa para a empresa.

### **5.1 Força de arrasto e força de sustentação**

Quando em operação, ou até durante os processos de descolagem e aterragem, os vários balões que constituem a plataforma sofrem a ação do vento devido ao facto de estarem imersos no escoamento. Velocidades de vento elevadas irão originar forças de arrasto e de sustentação mais elevadas assim como velocidades de vento reduzidas resultam em forças com valores mais baixos. A rotação imposta aos balões tem também um papel bastante

importante uma vez que influencia os coeficientes de arrasto e de sustentação, estes que por sua vez, intervêm nos valores das forças aerodinâmicas.

Para o cenário onde os balões não têm rotação imposta, apenas existe a componente paralela à direção do movimento do fluido da força que este exerce sobre o balão, isto é, a força de arrasto. Para chegar ao valor desta força recorre-se à equação (1.1).

Para obter o valor da área projetada dos balões no sentido do escoamento, é necessário ter em consideração as suas dimensões. Na Tabela 5.1 estão indicados os valores destas mesmas medidas.

**Tabela 5.1: Dimensões e valor da área projetada dos dois tipos de balões.**

	Balão principal	Balão secundário
<b>Comprimento [m]</b>	16	16
<b>Diâmetro [m]</b>	3,8	2,5
<b>Área projetada [m<sup>2</sup>]</b>	60,8	40

Como os balões, neste caso, não têm rotação imposta, o valor do coeficiente de arrasto é calculado com base no número de *Reynolds*.

O número de *Reynolds* é um número adimensional que avalia a estabilidade de um fluxo dando a indicação se o escoamento flui de forma laminar ou turbulenta [20].

Um baixo número de Reynolds indica um movimento do escoamento viscoso e muito lento onde os efeitos de inércia podem ser desprezados. Por outro lado, para um elevado número de Reynolds, o escoamento é considerado turbulento predominando as forças de inércia. O número de *Reynolds*,  $Re$ , é expresso pela equação (5.1):

$$Re = \frac{\rho_{ar} \times U_{\infty} \times d}{\mu_{ar}} \quad (5.1)$$

Com  $\rho_{ar}$  sendo a massa volúmica do fluido (neste caso ar),  $U_{\infty}$  a velocidade do escoamento,  $d$  o diâmetro do balão e  $\mu_{ar}$  a viscosidade do fluido (neste caso ar) [4].

Considerando uma gama de velocidades do vento entre 1 m/s e 18 m/s e a massa volúmica e a viscosidade do ar iguais a 1,225 kg/m<sup>3</sup> e 1,8 × 10<sup>-5</sup> N · s/m<sup>2</sup> respetivamente [4], recorrendo à equação (5.1), vem para o balão principal:

$$Re_{[BP,U=1]} = \frac{1,225 \times 1 \times 3,8}{1,8 \times 10^{-5}} = 2,59 \times 10^5$$

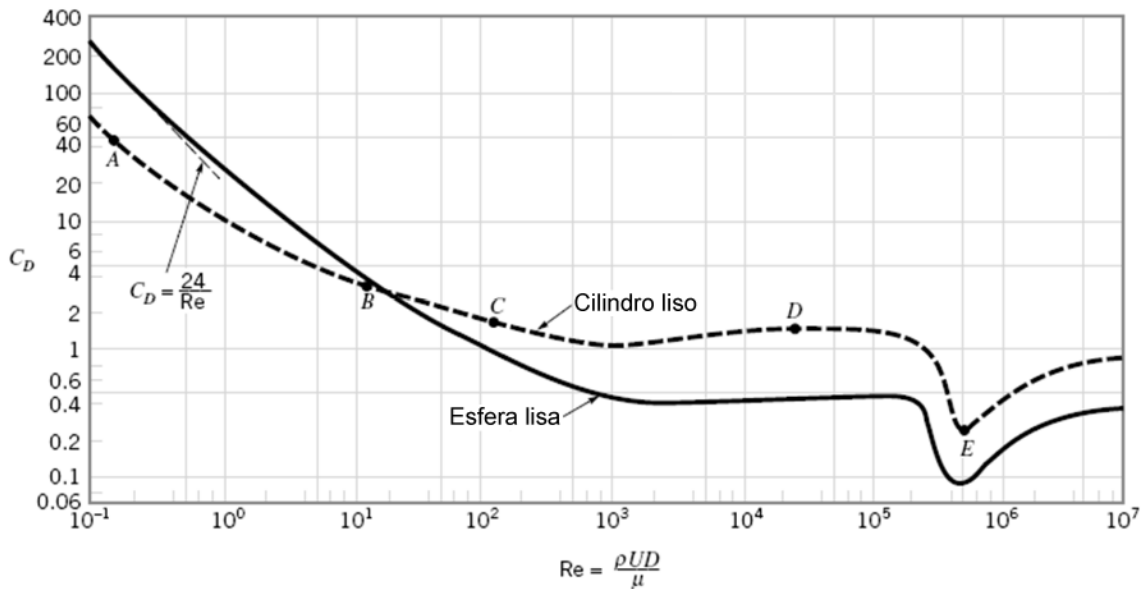
$$Re_{[BP,U=18]} = \frac{1,225 \times 18 \times 3,8}{1,8 \times 10^{-5}} = 4,66 \times 10^6$$

Para o caso de um balão secundário vem:

$$Re_{[BS,U=1]} = \frac{1,225 \times 1 \times 2,5}{1,8 \times 10^{-5}} = 1,70 \times 10^5$$

$$Re_{[BS,U=18]} = \frac{1,225 \times 18 \times 2,5}{1,8 \times 10^{-5}} = 3,06 \times 10^6$$

Assumindo que os balões que constituem a plataforma são todos eles lisos, com base nos intervalos de números de *Reynolds* calculados anteriormente é possível determinar o valor do coeficiente de arrasto através do gráfico da Figura 5.1.



**Figura 5.1:** Gráfico que relaciona o coeficiente de arrasto,  $C_d$ , com o número de Reynolds,  $Re$ , de uma esfera e um cilindro lisos (adaptado de [21]).

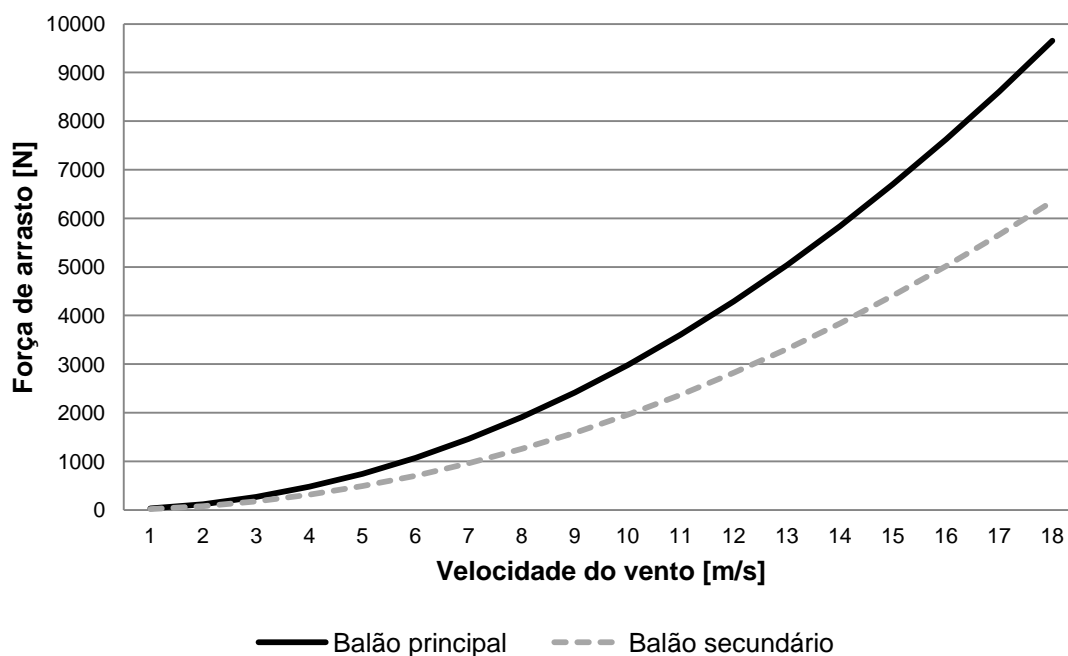
Observando a Figura 5.1, foi considerado aceitável a utilização do mesmo valor de coeficiente de arrasto para ambos os casos. Depois de debater com a equipa de projeto, foi definido que um bom valor do coeficiente de arrasto a utilizar seria 0,8.

Com base no valor do coeficiente de arrasto, massa volúmica do ar, área projetada de cada balão e certos valores de velocidade de vento, é possível construir a Tabela 5.2 onde se resume os valores da força de arrasto que atuam nos dois tipos de balões quando estes não têm rotação imposta.

**Tabela 5.2: Valores das forças de arrasto que atuam nos balões quando estes não têm rotação imposta.**

Velocidade do vento [m/s]	Força de arrasto [N]	
	Balão principal	Balão secundário
4	476,67	313,60
5	744,80	490,00
6	1072,51	705,60
7	1459,81	960,40
8	1906,69	1254,40
10	2979,20	1960,00
12	4290,05	2822,40
14	5839,23	3841,60
16	7626,75	5017,60
18	9652,61	6350,40

A partir dos valores apresentados na Tabela 5.2 é possível construir o gráfico da Figura 5.2 onde se compara as forças de arrasto que atuam nos dois tipos de balões.



**Figura 5.2: Gráfico comparativo das forças de arrasto para os dois tipos de balões quando estes não têm rotação imposta.**



Como era esperado, a força de arrasto que atua no balão principal é sempre superior à que atua nos balões secundários. A justificação para tal é o facto da força de arrasto, tal como é visível pela equação (1.1), ser diretamente proporcional à área projetada dos balões na direção do escoamento, esta que é superior no caso do balão principal.

Quando é imposta rotação aos balões, para além da força de arrasto, surge a componente perpendicular à direção do escoamento da força que este exerce sobre os balões. Esta componente é a força de sustentação. Para calcular o valor desta força recorre-se à equação (1.2). Para o caso da força de arrasto, a equação a usar é a mesma equação (1.1) tal como anteriormente.

Para além de originar a força de sustentação, a rotação imposta aos balões influencia também o modo como os coeficientes de arrasto e de sustentação são calculados. Neste caso, deixa de ser utilizado o gráfico da Figura 5.1 e passa a ser utilizado o gráfico já apresentado anteriormente na Figura 1.3. Deste modo, os coeficientes de arrasto e sustentação passam a ser dependentes da razão de velocidades,  $x$ , dada pela equação (5.2).

$$x = \frac{r \times \omega}{U_{\infty}} \quad (5.2)$$

Com  $r$  sendo o raio de cada balão,  $\omega$  a velocidade angular de cada balão em rad/s e  $U_{\infty}$  a velocidade do escoamento [4].

Dadas as várias dependências dos coeficientes de arrasto e sustentação (dependem da velocidade angular dos balões e da velocidade do escoamento) o cálculos dos valores das forças de arrasto e de sustentação não é tão linear como no caso onde os balões não têm rotação. Devido a este fator, apenas serão calculadas as forças de arrasto e de sustentação para os casos mais relevantes do problema, ou seja, cenário com velocidade do vento e velocidade angular dos balões máximas e cenário de descolagem e aterragem do sistema com velocidades de vento e velocidades angulares dos balões mais baixas e moderadas.

No caso mais desfavorável possível, os balões com motores que constituam a plataforma irão ter uma velocidade angular igual a 70 RPM, estando sujeitos também a rajadas de vento na ordem dos 18 m/s (de salientar que este é o pior cenário possível a que plataforma pode operar sendo que não é recomendado que para velocidades elevadas do escoamento, os balões tenha velocidades angulares muito elevadas).

Para o balão principal, substituindo os valores na equação (5.2) vem:

$$x = \frac{\left(\frac{3,8}{2}\right) \times \left(70 \times \frac{2\pi}{60}\right)}{18} = 0,77$$

Já para um balão secundário, substituindo os valores na equação (5.2) temos:

$$x = \frac{\left(\frac{2,5}{2}\right) \times \left(70 \times \frac{2\pi}{60}\right)}{18} = 0,51$$

Com base na razão de velocidades de ambos os tipos de balões, recorrendo ao gráfico da Figura 1.3, é possível chegar aos valores dos coeficientes de arrasto e de sustentação a considerar no caso do balão principal e dos balões secundários. Os valores dos coeficientes estão resumidos na Tabela 5.3

**Tabela 5.3: Valores dos coeficientes de arrasto e de sustentação para os dois tipos de balões com rotação imposta e velocidade do vento e velocidade angular máximas.**

	Balão principal ( $x = 0,77$ )	Balão secundário ( $x = 0,51$ )
<b>Coeficiente de arrasto</b>	1,2	1,2
<b>Coeficiente de sustentação</b>	2	1,7

Com base nos valores dos coeficientes da tabela anterior, as forças de arrasto, de sustentação e a aerodinâmica resultante podem ser calculadas através da equação (1.1), (1.2) e (1.3) respetivamente. Assumindo, tal como anteriormente, que a massa volúmica do ar é igual a  $1,225 \text{ kg/m}^3$  é possíveis construir a Tabela 5.4. De notar que os valores obtidos não têm em consideração o valor dos pesos e impulsão de cada balão.

**Tabela 5.4: Valores das forças de arrasto, sustentação e resultante para os dois tipos de balões com rotação imposta e velocidade do vento e velocidade angular máximas.**

	Balão principal	Balão secundário
<b>Força de arrasto [N]</b>	14478,91	9525,60
<b>Força de sustentação [N]</b>	24131,52	13494,60
<b>Força aerodinâmica resultante [N]</b>	28141,95	16517,91

Tal como anteriormente, também como seria de esperar, as forças que atuam no balão principal são superiores às que atuam nos balões secundários. A juntar a isso, dado os coeficientes de sustentação serem superiores aos de arrasto, promove que as forças de sustentação sejam também sempre maiores que as de arrasto.

Para o caso onde a plataforma está a descolar e a aterrar, como já referido, serão consideradas velocidades, quer do vento quer angular dos balões, menores que as máximas permitidas, ou seja, estes processos apenas são levados em períodos de vento reduzido.

Depois de abordar este tema com a equipa de projeto, foi decidido que os processos de descolagem e aterragem seriam levados com velocidades de vento máximas de 7 m/s. Em relação à velocidade angular dos balões, esta não ultrapassará as 35 RPM. Deste modo, para o caso do balão principal, substituindo os valores na equação (5.2) vem:

$$x = \frac{\left(\frac{3,8}{2}\right) \times \left(35 \times \frac{2\pi}{60}\right)}{7} = 0,99$$

Já para um balão secundário, substituindo os valores na mesma equação temos:

$$x = \frac{\left(\frac{2,5}{2}\right) \times \left(35 \times \frac{2\pi}{60}\right)}{7} = 0,65$$

Repetindo o raciocínio levado para o caso mais desfavorável apresentado anteriormente, os novos valores dos coeficientes de arrasto e de sustentação são os apresentados na Tabela 5.5.

**Tabela 5.5: Valores dos coeficientes de arrasto e de sustentação para os dois tipos de balões com rotação imposta durante os processos de descolagem e aterragem.**

	Balão principal ( $x = 0,99$ )	Balão secundário ( $x = 0,65$ )
<b>Coeficiente de arrasto</b>	1,2	1,2
<b>Coeficiente de sustentação</b>	2,3	1,9

Substituindo nas equações (1.1), (1.2) e (1.3) os valores da massa volúmica, área projetada, velocidade do vento e coeficientes de arrasto e de sustentação da Tabela 5.5, chega-se às forças de arrasto, de sustentação e aerodinâmica resultante apresentadas na Tabela 5.6. De salientar novamente que os valores obtidos não têm em consideração o valor dos pesos e impulsão de cada balão.

**Tabela 5.6: Valores das forças de arrasto, sustentação e resultante para os dois tipos de balões com rotação imposta durante os processos de descolagem e aterragem.**

	Balão principal	Balão secundário
<b>Força de arrasto [N]</b>	2189,71	1440,60
<b>Força de sustentação [N]</b>	4196,95	2280,95
<b>Força aerodinâmica resultante [N]</b>	4733,84	2697,79

Comparando os valores da Tabela 5.6 com os da Tabela 5.4, verifica-se que as forças que atuam nos balões quando estes estão a descolar e aterrar são, como desejado, significativamente menores que no primeiro caso abordado. A justificação para tal passa, sobretudo, pelo facto dos valores das forças serem diretamente proporcionais ao quadrado da velocidade. É assim demonstrado a importância de descolar e aterrar os balões da plataforma com velocidades angulares e de vento reduzidas.

## 5.2 Ângulo de equilíbrio em relação à horizontal

Para calcular o ângulo de equilíbrio dos vários balões da plataforma é necessário conhecer, para além das forças de arrasto e sustentação calculadas anteriormente, a força de impulsão resultante e o peso próprio dos balões.

Para chegar ao valor da força de impulsão resultante é necessário ter em conta o peso do próprio hélio que enche os vários balões. Deste modo, a força de impulsão resultante,  $I$ , vem dada pela equação (5.3):

$$I = (\rho_{ar} - \rho_{He}) \times V \times g \quad (5.3)$$

Com  $\rho_{ar}$  sendo a massa volúmica do fluido circundante, ou seja, ar,  $\rho_{He}$  a massa volúmica do hélio,  $V$  o volume do balão e  $g$  a aceleração da gravidade.

Admitindo que a massa volúmica do hélio e do ar são, respetivamente,  $0,1785 \text{ kg/m}^3$  e  $1,225 \text{ kg/m}^3$  e recorrendo às dimensões dos balões da Tabela 5.1, substituído os termos na equação (5.3) vem para o balão principal:

$$I_{BP} = (1,225 - 0,1785) \times \left( \left( \frac{3,8}{2} \right)^2 \times \pi \times 16 \right) \times 9,81 \cong 1862,9 \text{ N} \cong 190 \text{ kgf}$$

Para o caso dos balões secundários, a impulsão resultante é:

$$I_{BS} = (1,225 - 0,1785) \times \left( \left( \frac{2,5}{2} \right)^2 \times \pi \times 16 \right) \times 9,81 \cong 806,3 \text{ N} \cong 82,19 \text{ kgf}$$

No que diz respeito ao peso dos próprios balões, é necessário considerar o peso do envelope que compõe cada balão e o peso dos componentes localizados nos dois topos.

Visto que o balão principal é um sistema já bastante estudado pela empresa, é admitido que o peso total do conjunto ronda os 150 kgf (peso do envelope é 90 kgf e os restantes 60 kgf são igualmente distribuídos pelos dois topos).

No caso dos balões secundários, é admitido que por cada topo estão distribuídos 20 kg sendo que o peso do envelope tem de ser estimado. Sabendo que a massa do envelope usado nos balões é de cerca de  $0,225 \text{ kg/m}^2$  de superfície, calculando a área da superfície do balão

planificado é possível chegar ao valor do seu peso. A área planificada da superfície do balão,  $A_p$ , é então dada por:

$$A_p = 2 \times \left( \pi \times \left( \frac{d}{2} \right)^2 \right) + \left( 2 \times \pi \times \left( \frac{d}{2} \right) \times L \right) \quad (5.4)$$

Com  $d$  e  $L$  sendo, respetivamente, o diâmetro e comprimento do balão.

Substituindo os valores da Tabela 5.1 na equação (5.4) vem que a área planificada da superfície de um balão secundário é:

$$A_p = 2 \times \left( \pi \times \left( \frac{2,5}{2} \right)^2 \right) + \left( 2 \times \pi \times \left( \frac{2,5}{2} \right) \times 16 \right) = 135,48 \text{ m}^2$$

O peso do envelope é então:

$$P = \rho_A \times A_p = 0,225 \times 135,48 \cong 30,48 \text{ kg}$$

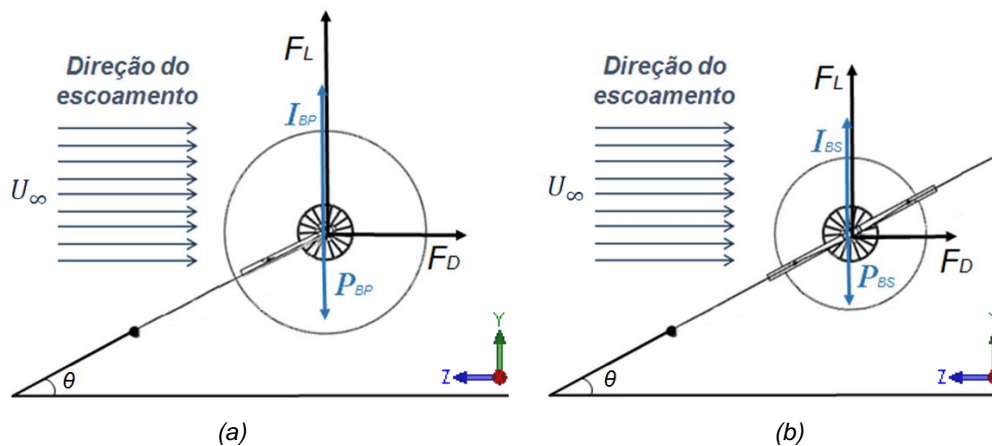
O peso total dos balões secundários é então 70,48 kgf.

Na Tabela 5.7 estão sumariados todos os valores dos pesos e da força de impulsão resultante para cada tipo de balão.

**Tabela 5.7: Valores das forças de impulsão resultantes e pesos dos dois tipos de balões.**

	Balão principal	Balão secundário
<b>Força de impulsão resultante [kgf]</b>	190	82,19
<b>Peso total [kgf]</b>	150	70,48

Uma vez calculados os pesos e forças de impulsão resultantes de cada balão, os ângulos de equilíbrio são obtidos relacionando estes esforços com as restantes forças que atuam nos balões. O diagrama de forças do balão principal e balão secundário (com rotação) estão representados na Figura 5.3.



**Figura 5.3: Diagrama de forças que atuam nos dois tipos de balões; (a) Balão principal; (b) Balão secundário com rotação.**

Na Figura 5.3  $I_{BP}$ ,  $I_{BS}$ ,  $P_{BP}$  e  $P_{BS}$  representam, respetivamente, a força de impulsão resultante do balão principal, a força de impulsão resultante do balão secundário, o peso do balão principal e o peso do balão secundário.

Por exemplo, para o cenário onde os balões têm rotação imposta com velocidade do vento e velocidade angular dos balões máximas, substituindo os valores da Tabela 5.4 e Tabela 5.7 na equação (1.4) temos, que o ângulo de equilíbrio que o balão principal faz com a horizontal é igual a:

$$\theta = \arctg\left(\frac{\frac{24131,52}{9,81} + 190 - 150}{\frac{14478,91}{9,81}}\right) = 59,44^\circ$$

Para o caso dos balões secundários, o ângulo de equilíbrio é dado por:

$$\theta = \arctg\left(\frac{\frac{13494,60}{9,81} + 82,19 - 70,48}{\frac{9525,60}{9,81}}\right) = 55^\circ$$

Caso os balões não tenham rotação imposta, a força de sustentação é nula, influenciando drasticamente o ângulo de equilíbrio com a horizontal. Recorrendo aos valores da Tabela 5.2, para velocidade de vento igual a 7 m/s temos que o ângulo de equilíbrio que o balão principal faz com a horizontal é:

$$\theta = \arctg\left(\frac{190 - 150}{\frac{1459,81}{9,81}}\right) = 15,05^\circ$$

Para o caso dos balões secundários, o ângulo de equilíbrio é:

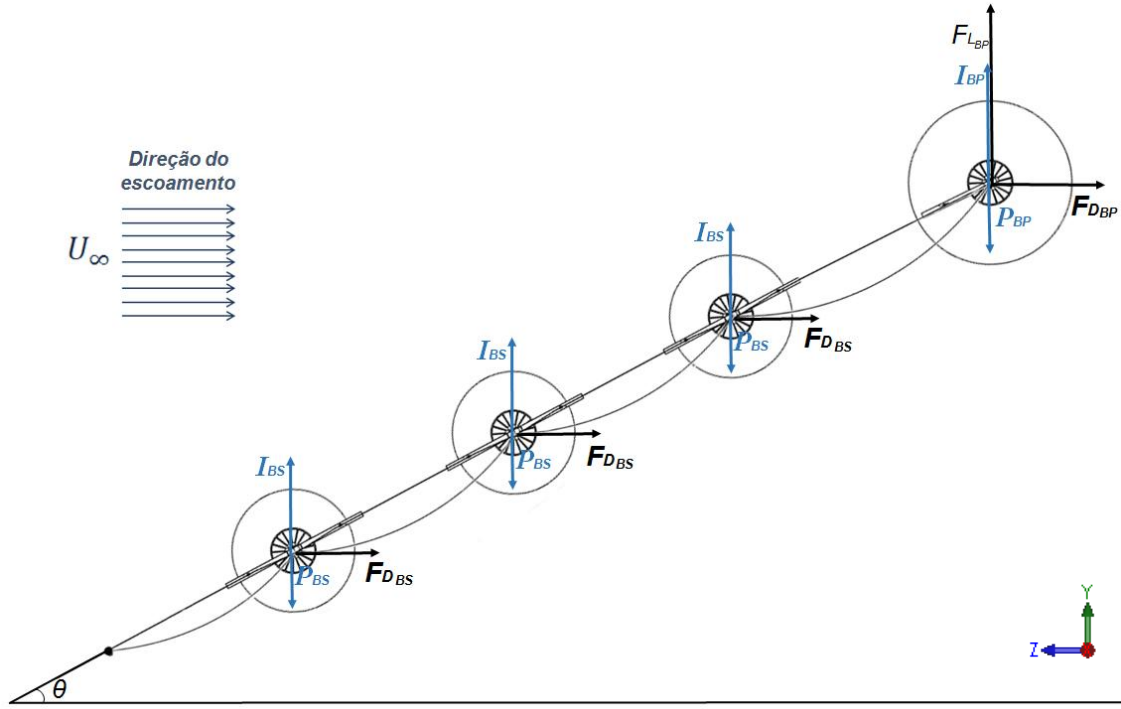
$$\theta = \arctg\left(\frac{82,19 - 70,48}{\frac{960,40}{9,81}}\right) = 6,82^\circ$$

Verificamos assim que a rotação imposta aos balões apresenta um importante papel uma vez que promove que os balões fiquem em equilíbrio a uma altura mais elevada do solo (valor do ângulo superior), assegurando assim uma maior segurança.

Pelas Tabelas B1 e B2 em anexo, é possível observar que o ângulo de equilíbrio para os dois tipos de balões com rotação (e às mesmas RPM) é bastante semelhante, sendo a diferença entre os valores bastante reduzida e em média de  $4,5^\circ$ . No caso onde os balões não têm rotação, a diferenças entre valores aumenta sendo que o ângulo dos balões secundários tende a ser metade do ângulo do balão principal (para a mesma velocidade de vento). Todavia, é admissível considerar que, em casos em que a plataforma é constituída por mais que um

balão com e sem rotação imposta, todos os balões do sistema tendem para o equilíbrio com o mesmo valor de ângulo face à horizontal.

O caso mais relevante para estudo é então o cenário de descolagem e aterragem da plataforma. Para uma plataforma constituída por quatro balões, o diagrama de forças que atuam nos balões está esquematizado na Figura 5.4.



**Figura 5.4: Diagrama de forças que atuam nos vários balões que constituem a plataforma durante o processo de descolagem e aterragem.**

De salientar que no caso da aterragem e descolagem da plataforma, a rotação de todos os balões secundários é interrompida (caso estes tenham rotação) passando o balão principal a ser o único balão com velocidade angular. Deste modo, tal como é possível observar na Figura 5.4, os balões secundário deixam de ter força de sustentação,  $F_L$ .

O ângulo de equilíbrio de toda a plataforma passa então a ser dado por:

$$\theta = \arctg \left( \frac{(F_{LBP} + I_{BP} - P_{BP}) + 3 \times (I_{BS} - P_{BS})}{F_{DBP} + 3 \times F_{DBS}} \right) \quad (5.5)$$

Substituindo os valores da Tabela 5.2, Tabela 5.6 e Tabela 5.7 na equação (5.5) vem:

$$\theta = \arctg \left( \frac{\left( \frac{4196,95}{9,81} + 190 - 150 \right) + 3 \times (82,19 - 70,48)}{\frac{2189,71}{9,81} + 3 \times \frac{960,40}{9,81}} \right) = 44,22^\circ$$

O resultado obtido do ângulo de equilíbrio para a plataforma durante os processos de descolagem e aterragem é bastante importante sendo posteriormente utilizado na determinação da posição ideal da estrutura auxiliar destes mesmos processos.

Seguindo o mesmo raciocínio levado para o cálculo dos coeficientes de arrasto e sustentação, é possível, com base em valores de velocidades na gama de 1 m/s até 18 m/s, calcular os vários valores das forças de sustentação e arrasto para o balão principal em rotação. Se juntado a isso forem levados em conta os valores da força de arrasto dos balões secundários sem rotação para o mesmo intervalo de velocidades (valores da Tabela 5.2), é possível chegar aos valores dos ângulos de equilíbrio (para as várias velocidades) de uma plataforma composta pelo balão principal em rotação e três balões secundários sem rotação imposta. Todos estes valores estão sumariados na Tabela 5.8.

**Tabela 5.8: Valores dos ângulos de equilíbrio de uma plataforma composta pelo balão principal com rotação e três balões secundários sem rotação em função das velocidades de vento (De notar que os valores das forças referentes ao balão secundário são dados por unidade).**

Velocidade do vento [m/s]	Balão principal				Balão secundário (por unidade)			Ângulo de equilíbrio [°]
	$F_L$ [kgf]	$F_D$ [kgf]	$I$ [kgf]	$P$ [kgf]	$F_D$ [kgf]	$I$ [kgf]	$P$ [kgf]	
4	252,58	72,89	190	150	31,97	82,19	70,48	59,90
5	324,71	113,88			49,95			53,78
6	367,99	163,99			71,93			46,71
7	427,82	223,21			97,90			44,22
8	574,49	291,54			127,87			42,08
10	761,26	455,54			199,80			37,05
12	969,29	655,97			287,71			33,47
14	1304,87	892,85			391,60			32,95
16	1692,07	1166,20			511,48			32,60
18	2130,91	1475,93			647,34			32,36

Analisando a Tabela 5.8 é possível concluir que, para uma plataforma constituída pelo balão principal com rotação e três secundários sem rotação, à medida que a velocidade do vento aumenta, tal como já era esperado, os valores das forças de arrasto e sustentação (no caso do balão principal) também aumentam. No que toca ao ângulo de equilíbrio, este diminui significando que à medida que o vento é mais forte, os balões da plataforma ficam em equilíbrio mais baixo e perto do solo. Para valores de ângulos mais baixos, os processos de descolagem e sobretudo aterragem passam também a ser mais complicados, justificando



assim mais uma vez a importância da realização destes processos com velocidades de vento reduzidas.

O ângulo de equilíbrio com a horizontal é influenciado também pelo número de balões que constituem a plataforma. Na Tabela 5.8 foi considerado que o sistema era composto pelo balão do topo e três outros balões secundários, ou seja, o pior cenário possível já que a força de arrasto de um balão secundário (força que mais afeta o ângulo de equilíbrio das que atuam nos balões secundários) é multiplicada por o maior número possível de balões, isto é, três. Sempre que a plataforma é constituída por um menor número de balões secundários, a força de arrasto, tal como a força de impulsão resultante e peso, são multiplicados por um valor mais baixo (dois ou um), resultando num ângulo de equilíbrio com valor mais elevado (forças que atuam no balão principal mantêm-se iguais). Este acontecimento verifica-se ao longo do processo de aterragem onde, à medida que se faz a aterragem e o desacoplamento dos balões da plataforma, há tendência dos balões restantes se equilibrarem numa posição cada vez mais vertical em relação ao solo facilitando também o processo em si, uma vez que os balões vão sendo recolhidos numa posição mais vertical. No processo de descolagem ocorre exatamente o contrário, isto é, à medida que vão sendo acoplados os balões à plataforma, estes tendem a equilibrarem-se numa posição cada vez mais horizontal, fazendo no caso extremo, como já calculado, um ângulo de  $44,22^\circ$  com o solo (para uma velocidade de vento igual a 7 m/s sendo o balão do topo o único com velocidade angular e igual a 35 RPM).

É possível verificar o referido anteriormente na Tabela 5.9 onde são apresentados os valores dos ângulos de equilíbrio em função do número de balões que constituem a plataforma durante o processo de aterragem com velocidade de vento igual a 7 m/s e velocidade angular do balão do topo igual a 35 RPM.

***Tabela 5.9: Valores dos ângulos de equilíbrio em função do número de balões que constituem a plataforma durante o processo de aterragem (com  $U_\infty=7$  m/s e  $\omega=35$  RPM para o balão principal).***

Número de Balões principais	Número de balões secundários	Ângulo de equilíbrio [°]
1	3	44,22
	2	49,54
	1	56,19
	0	64,49

Com base nos valores, para os dois tipos de balões, da força aerodinâmica e de arrasto com rotação imposta (Tabela 5.4), força de arrasto sem rotação imposta (Tabela 5.2) e peso e impulsão resultante (Tabela 5.7), é possível calcular um rácio que relaciona a força resultante do sistema com a sua massa total permitindo deste modo averiguar as vantagens e o melhor modo de acoplar os balões à plataforma. Todo o raciocínio é apresentado em anexo (anexo C).

## 5.3 Forças a realizar pelos guinchos auxiliares e escolha de novos guinchos

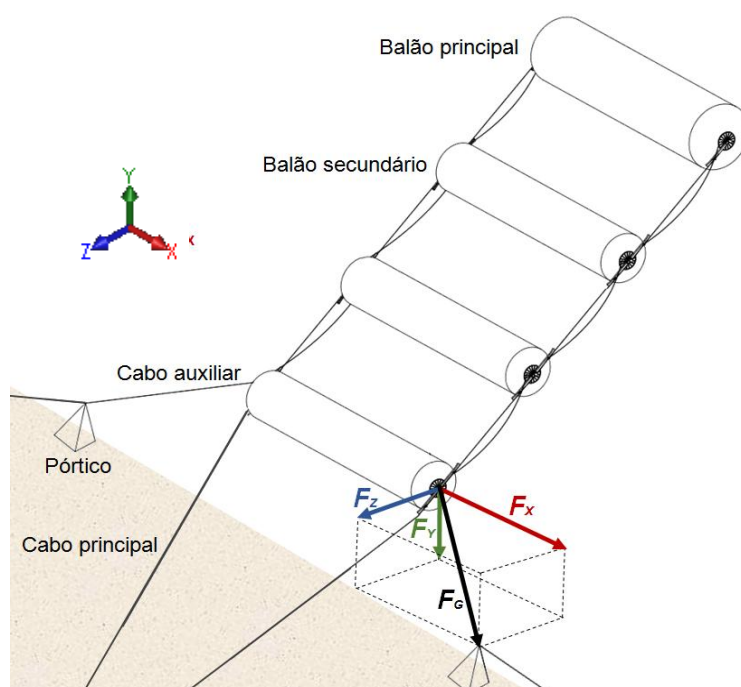
### 5.3.1 Cálculo da força que cada guincho auxiliar realiza

Para uma plataforma aérea ancorada composta por múltiplos balões, a aterragem prévia do *Bridle Point* em relação aos restantes balões (e o seu descolar após a descolagem de todos os balões) influencia substancialmente o papel dos guinchos auxiliares nestes processos uma vez que os esforços realizados na recolha dos balões passam a ser inteiramente produzidos por estes guinchos. A juntar a isso, uma vez que o sistema é constituído por vários balões, o valor destas forças aumenta sendo superior ao caso atual da empresa onde se trabalha com uma plataforma composta apenas pelo balão principal.

Dado estas alterações no sistema, os guinchos auxiliares atuais da empresa (apresentados na Figura 2.3) deixam de poder ser utilizados (tal como será visto no subcapítulo 5.3.2 mais adiante na dissertação), sendo necessário a escolha de um novo par de guinchos mais potentes. Para decidir os guinchos a adotar, é necessário prever a força que estes terão de realizar na situação mais desfavorável. Este cenário é então quando a plataforma, composta pelo balão principal e três secundários, está a aterrar.

Como decidido anteriormente, o processo de aterragem (tal como o de descolagem) é levado com velocidades de vento máximas de 7 m/s e com apenas o balão principal em rotação (velocidade angular máxima de 35 RPM).

A força total realizada por cada guincho será então a resultante das três componentes na direção de cada um dos eixos tal como é representado na Figura 5.5.



**Figura 5.5: Força resultante realizada por cada guincho auxiliar e respetivas componentes na direção de cada eixo.**

A força resultante realizada por cada guincho,  $F_G$ , é dada pela equação (5.6).

$$F_G = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2 + F_Z^2} \quad (5.6)$$

Com  $F_X$ ,  $F_Y$  e  $F_Z$  sendo, respetivamente, a força na direção  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ .

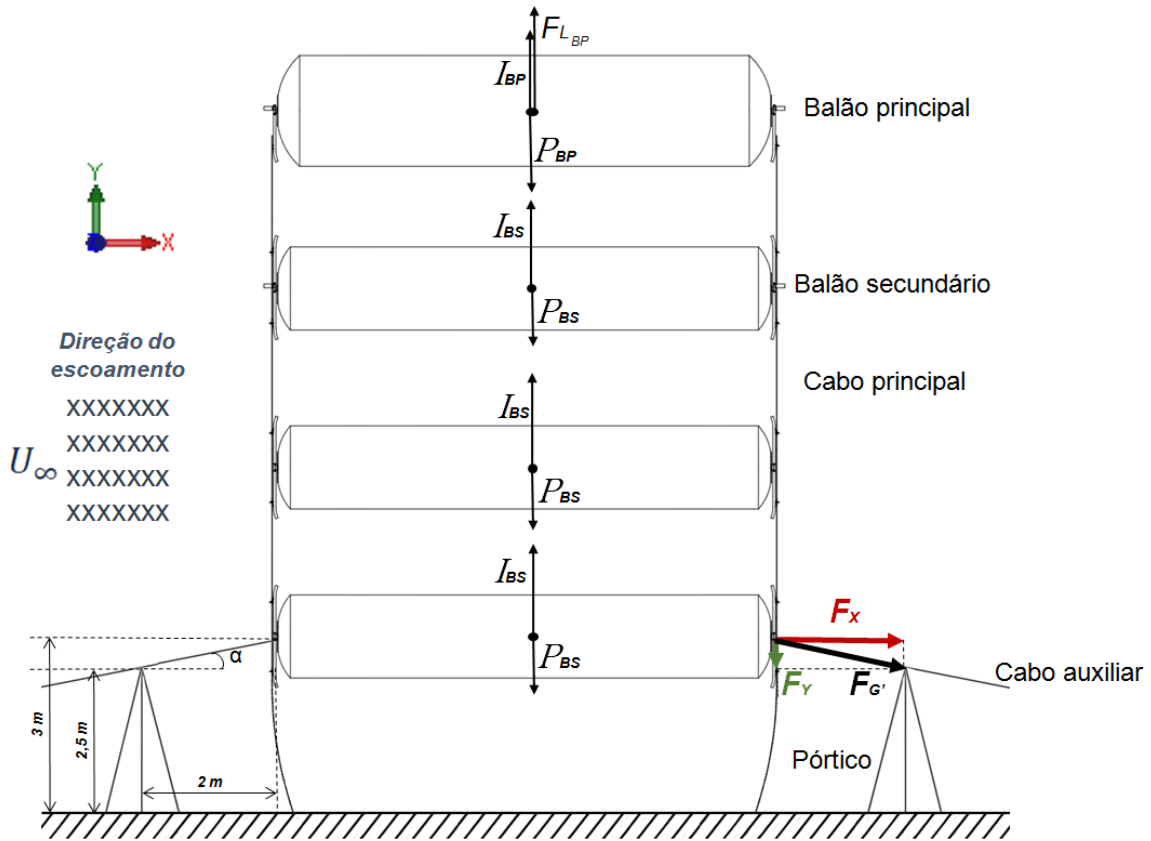
Para auxiliar a recolha dos cabos por parte dos guinchos, são utilizados dois pórticos em pirâmide por onde o cabo passa e é encaminhado até aos guinchos. A altura destes pórticos é de 2,5 metros.

Com base nesta dimensão, foi determinado que os pontos por onde os balões são recolhidos, isto é, as peças de ligação fixas aos blocos, não podem baixar e ficar a uma distância do solo inferior a 3 metros. Esta decisão tem como principal objetivo evitar que os cabos auxiliares fiquem completamente paralelos ao solo. Ao garantir este fator, é diminuída a componente em  $X$  da força e assim reduzida a força resultante que os guinchos têm de realizar. A componente em  $X$  é de resto a parcela que maior influência tem no cálculo da força resultante uma vez que esta aumenta à medida que os balões são recolhidos e os cabos ficam paralelos ao chão. Deste modo, para além de garantir uma maior segurança aos processos (turbulência e oscilações dos balões diminuem) é garantido que os guinchos não são sobredimensionados com base em forças exageradamente elevadas diminuindo também custos de aquisição.

A dimensão dos pórticos e a distância limite dos blocos dos balões ao solo são também bastante importantes no dimensionamento da estrutura auxiliar dos processos de descolagem e aterragem como será visto posteriormente.

A colocação dos pórticos na correta posição no local da aterragem/descolagem é também bastante relevante, tendo ficado decidido que estes estariam distanciados 2 metros na horizontal desde dos topos dos balões, ou seja, uma vez que os vários balões têm comprimento igual a 16 metros, os pórticos estarão sempre afastados 20 metros entre si.

Esta condição, assim como as duas referidas anteriormente são possíveis de observar na Figura 5.6 que representa a vista e o diagrama de forças que atuam no sistema, no plano  $XY$ , quando os balões são recolhidos.



**Figura 5.6: Diagrama de forças que atuam nos balões que constituem a plataforma, no plano XY, quando estes são recolhidos.**

Analisando a Figura 5.6 é possível escrever as equações das componentes  $X$  e  $Y$  da força resultante dos guinchos em função da força de sustentação do balão principal e força de impulsão resultante e peso de todos os balões. Vem então:

$$F_X = F_{G'} \times \cos \alpha \quad (5.7)$$

$$F_Y = F_{G'} \times \sin \alpha = \frac{(F_{LBP} + I_{BP} - P_{BP}) + 3 \times (I_{BS} - P_{BS})}{2} \quad (5.8)$$

$$F_{G'} = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2} \quad (5.9)$$

Relacionando a equação (5.7) e (5.8),  $F_X$  passa a ser dado por:

$$F_X = \frac{F_Y}{\sin \alpha} \times \cos \alpha = \frac{F_Y}{\tan \alpha} \quad (5.10)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{3 - 2,5}{2} \right) = 14,04^\circ$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{3-2,5}{2}\right) = 14,04^\circ$$

$$F_Y = \frac{(427,82 + 190 - 150) + 3 \times (82,19 - 70,48)}{2} = 251,48 \text{ kgf}$$
$$F_x = \frac{251,48}{\tan 14,04} = 1005,64 \text{ kgf}$$

61

Com base nas forças representadas na Figura 5.7 as equações que definem as componentes  $Y$  e  $Z$  da força resultante dos guinchos são dadas por:

$$F_Y = F_{G''} \times \sin \theta = \frac{(F_{L_{BP}} + I_{BP} - P_{BP}) + 3 \times (I_{BS} - P_{BS})}{2} \quad (5.11)$$

$$F_Z = F_{G''} \times \cos \theta = \frac{F_{D_{BP}} + 3 \times F_{D_{BS}}}{2} \quad (5.12)$$

$$F_{G''} = \sqrt{F_Y^2 + F_Z^2} \quad (5.13)$$

Substituindo na equação (5.12) os valores das forças de arrasto do balão principal em rotação e de um balão secundário parado (apresentados na Tabela 5.8 para o caso de velocidade de vento igual a 7 m/s), é possível chegar ao valor da componente da força dos guinchos em  $Z$ :

$$F_Z = \frac{223,21 + 3 \times 97,90}{2} = 258,46 \text{ kgf}$$

De notar que o ângulo representado por  $\theta$  é o ângulo de equilíbrio determinado no subcapítulo anterior através da equação (5.5). O seu valor concreto é  $44,22^\circ$ .

As componentes  $Y$  e  $Z$  são divididas por dois devido à existência de dois guinchos. Como a componentes da força  $F_X$  é calculada a partir do valor de  $F_Y$ , não é necessário dividir esta componente pelo número de guinchos.

Encontrados os valores das três componentes da força realizada pelos guinchos, substituindo os termos na equação (5.6), é possível determinar a força total que os guinchos têm de realizar na recolha dos balões no pior cenário possível:

$$F_G = \sqrt{1005,64^2 + 251,48^2 + 258,46^2} = 1068,34 \text{ kgf} \cong 10480,44 \text{ N}$$

Conclui-se assim que cada guincho auxiliar tem de ter capacidade para, no mínimo, realizar uma força de 10480,44 N, ou seja, tem de ser capaz de puxar sensivelmente 1070 kgf.

### 5.3.2 Escolha de novos guinchos auxiliares

Para uma plataforma aérea ancorada composta por múltiplos balões, a força que os guinchos auxiliares necessitam de realizar durante os processos de descolagem e aterragem aumenta consideravelmente quando comparada com os valores para casos onde a plataforma é apenas composta por um balão. Como visto no subcapítulo anterior, para o pior cenário possível dos processos de descolagem e aterragem, cada guincho tem de suportar uma força de tração igual a 10480,44 N, ou seja, sensivelmente 1070 kgf.

Como já referido no subcapítulo 2.1.3, os guinchos auxiliares que a *Omnidea* dispõem atualmente são da empresa *COMEUP* sendo do modelo CP-500T dos guinchos elétricos.

Estes guinchos apresentam um binário de 41,26 kgf·m e uma velocidade angular aproximada de 3,67 rad/s.

De modo a verificar se os guinchos auxiliares atuais podem ser utilizados para a descolagem e aterragem de uma plataforma formada por vários balões, é necessário analisar as suas especificações em termos, sobretudo, de força de tração. Para o caso específico onde é usado um cabo de *Dyneema* de 6 mm de diâmetro, estas especificações são apresentadas na Tabela 5.10.

**Tabela 5.10: Especificações dos guinchos auxiliares atuais da empresa para um cabo de Dyneema de diâmetro 6 mm (adaptado de [11]).**

<i>Layer</i>	Raio [m]	Força de tração [kgf]	Velocidade de recolha do cabo [m/min]	Comprimento de cabo armazenado [m]
1	0,054	757,00	12,00	12,44
2	0,060	687,61	13,21	26,26
3	0,066	625,10	14,53	41,47
4	0,072	573,01	15,85	58,06
5	0,078	528,93	17,17	76,03

Analisando a Tabela 5.10, é possível verificar que a força máxima que os guinchos auxiliares atuais que a empresa dispõem é de 757 kgf que, tal como era espectável, é inferior à força mínima necessária (1068,34 kgf) para o caso de uma plataforma constituída por múltiplos balões. É confirmada assim a necessidade de escolher um novo par de guinchos auxiliares para o sistema.

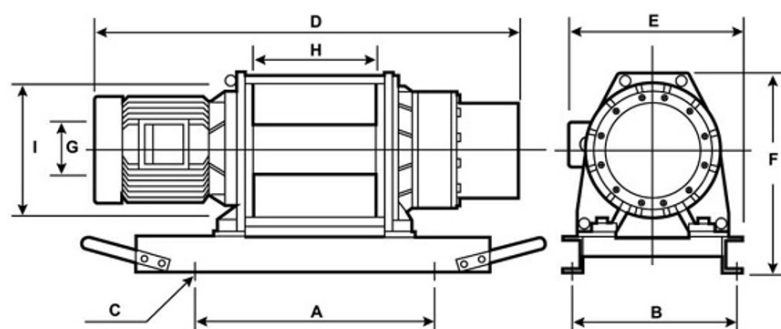
Uma vez que o fabricante *COMEUP* apresenta uma vasta lista de guinchos elétricos para além do modelo CP-500T, foi dada prioridade a esta empresa durante a escolha dos novos guinchos auxiliares. O modelo escolhido para o novo par de guinchos elétricos auxiliares foi então o CWG-30375 (Figura 5.8).



**Figura 5.8: Guincho CWG-30375 do fabricante COMEUP [22].**

Segundo o fabricante, o guincho CWG-30375 é de fácil montagem e bastante seguro uma vez que possui um travão eletromagnético, um limitador de capacidade que evita a sobrecarga do guincho e um interruptor (caso solicitado) que permite a paragem imediata do sistema. A máxima eficiência mecânica é garantida pelo uso de engrenagens planetárias e rolamentos de esferas de alta eficiência e resistência a elevados esforços. O peso de cada guincho é 185 kgf [22].

As dimensões do guincho CWG-30375 são apresentadas na Figura 5.9.



Modelo	A	B	C	D	E	F	G	H	I
CWG-30375	500	370	4 – Ø19	974	400	445	127	230	275

**Figura 5.9: Dimensões do guincho CWG-30375 (adaptado de [22]).**

À semelhança dos guinchos CP-500T, o cabo usado nos guinchos CWG-30375 é cabo de aço sendo neste último caso específico com diâmetro igual a 10 mm. Deste modo, uma vez que os cabos de aços em ambos os guinchos serão substituídos por cabos de *Dyneema* com 6 mm de diâmetro, as especificações apresentadas no catálogo do fabricante acerca do guincho CWG-30375 não corresponderam à realidade do sistema da *Omnidea*. Deste modo, é necessário a adaptação das especificações dos guinchos ao caso onde são usados os cabos auxiliares de *Dyneema* com 6 mm de diâmetro.

Algumas das dimensões (já apresentadas na Figura 5.9) e características mais relevantes do guincho CWG-30375 para a adaptação das especificações estão sumariadas na Tabela 5.11.

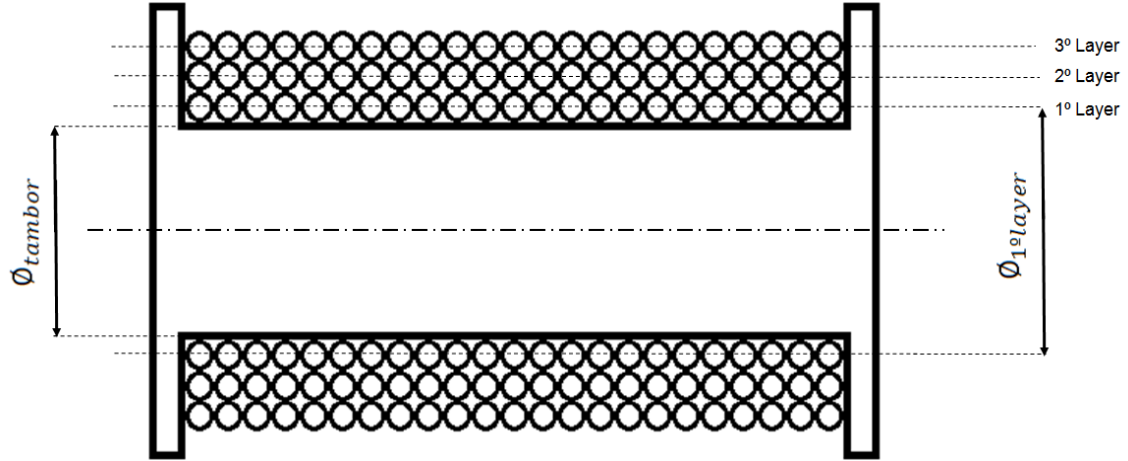
**Tabela 5.11: Dimensões e características mais relevantes do guincho CWG-30375 [22].**

<b>Binário do tambor, <math>B</math> [kgf·m]</b>	97,68
<b>Velocidade angular do tambor, <math>\omega</math> [rad/s]</b>	2,07
<b>Diâmetro do tambor do guincho, <math>\phi_{tambor}</math> [mm]</b>	127
<b>Diâmetro da flange do tambor <math>\phi_{flange}</math> [mm]</b>	275
<b>Comprimento do tambor, <math>L_{tambor}</math> [mm]</b>	230
<b>Diâmetro do cabo, <math>\phi_{cabo}</math> [mm]</b>	6



Tanto o valor do binário como o da velocidade angular, apresentados na tabela anterior, foram obtidos tendo por base os valores fornecidos pelo fabricante acerca da força e velocidade de recolha de cabo para o caso onde é utilizado um cabo de aço.

Para ser possível fazer a adaptação das especificações do guincho é importante introduzir o conceito de *layer*, que neste contexto, simboliza cada camada formada pelo enrolamento do cabo no tambor do guincho. Na Figura 5.10 é possível visualizar um esquema de um tambor com 3 *layers* de cabo.



**Figura 5.10: Esquema do tambor do guincho com 3 layers de cabo.**

Observando a Figura 5.10 é possível definir relações entre o diâmetro de cada *layer* e o diâmetro do tambor. O diâmetro da 1ª *layer*,  $\phi_{1ªlayer}$ , é dado então por:

$$\phi_{1ªlayer} = \phi_{tambor} + \phi_{cabo} \quad (5.12)$$

Com  $\phi_{tambor}$  sendo o diâmetro do tambor e  $\phi_{cabo}$  o diâmetro do cabo de *Dyneema*.

De um modo geral, o valor do diâmetro da *n*-ésima *layer*,  $\phi_{nªlayer}$ , é dado por:

$$\phi_{nªlayer} = \phi_{tambor} + (2 \times n - 1) \times \phi_{cabo} \quad (5.13)$$

Com *n* sendo o número da *layer* pretendida (*n* = 1, 2, 3, ...).

O valor do diâmetro de cada *layer* ganha importância uma vez que é necessário (tal como o binário, *B*, do guincho) para o cálculo da força de tração que o guincho produz. No que diz respeito à velocidade de recolha do cabo, esta tem em conta, para além também do diâmetro de cada *layer*, a velocidade angular do tambor. A força,  $F_{tG}$ , e a velocidade de recolha do cabo,  $V_{recolha}$ , são dadas respetivamente pelas equações (5.14) e (5.15):

$$F_{tG} = \frac{B}{\frac{\phi_{n^{o}layer}}{2}} \quad (5.14)$$

$$V_{recolha} = \omega \times \frac{\phi_{n^{o}layer}}{2} \quad (5.15)$$

Com  $B$  e  $\omega$  sendo, respetivamente, o binário e a velocidade angular do tambor do guincho e  $\phi_{n^{o}layer}$  o diâmetro da  $n$ -ésima *layer*.

Para ter ideia da quantidade de cabo que vai sendo armazenado no tambor de cada guincho ao longo da recolha dos balões, é possível calcular o comprimento total do cabo armazenado,  $L_{cabo\ arm.}$ , através da equação (5.16):

$$L_{cabo\ arm.} = \sum_{n=1}^i \left( \frac{L_{tambor}}{\phi_{cabo}} \times \pi \times \phi_{n^{o}layer} \right) \quad (5.16)$$

Com  $L_{tambor}$  sendo o comprimento do tambor,  $\phi_{cabo}$  o diâmetro do cabo de *Dyneema* e  $\phi_{n^{o}layer}$  o diâmetro da  $n$ -énésima *layer* [23].

Recorrendo aos valores da Tabela 5.11 e aplicando as equações (5.13), (5.14), (5.15) e (5.16) é possível adaptar as especificações do guincho para o caso onde é utilizado um cabo de *Dyneema* com 6 mm de diâmetro. As especificações, já adaptadas, das forças e velocidades de recolha do cabo em função das primeiras 5 *layers* estão presentes na Tabela 5.12.

**Tabela 5.12: Especificações dos novos guinchos auxiliares CWG-30375 para um cabo de *Dyneema* com diâmetro 6 mm.**

<i>Layer</i>	Diâmetro <i>layer</i> [m]	Força de tração [kgf]	Velocidade de recolha do cabo [m/min]	Comprimento de cabo armazenado [m]
1	0,133	1426,00	8,50	16,02
2	0,145	1347,32	8,99	33,48
3	0,157	1244,34	9,74	52,39
4	0,169	1155,99	10,49	72,74
5	0,181	1079,348	11,23	94,54

Analisando os valores das forças de tração e do comprimento de cabo armazenado da Tabela 5.12 verifica-se que a utilização dos guinchos CWG-30375 é uma boa solução já que, uma vez que os cabos auxiliares têm comprimento igual a 60 metros, a força de tração que os guinchos realizam encontra-se ente 1155,99 kgf e 1244,34 kgf, sendo estes valores sempre superiores ao valor máximo de 1068,34 kgf que é exigido. É de salientar porém que os guinchos nunca recolhem os cabos auxiliares por completo, ou seja, apenas serão enrolados no tambor cerca de 54 metros. Posteriormente, em subcapítulos seguintes, são calculados os

valores exatos do comprimento de cabo que é armazenado no tambor e da força que os guinchos produzem no momento em que os balões pousam e aterram na estrutura auxiliar.

Caso se pretenda aumentar o comprimento dos cabos auxiliares para valores superiores a 60 metros, não será necessário alterar o tambor e os guinchos auxiliares CWG-30375.

Com base no diâmetro da flange, tambor do guincho e cabo de *Dyneema* é possível chegar ao comprimento máximo de cabo que é possível armazenar no tambor. Para isso basta subtrair ao diâmetro da flange o valor do diâmetro do tambor, dividindo de seguida por dois. O resultado dará o comprimento desde da superfície do tambor até ao topo da flange,  $C$ :

$$C = \frac{\phi_{flange} - \phi_{tambor}}{2} = \frac{275 - 127}{2} = 74 \text{ mm}$$

Dividindo o comprimento  $C$  pelo diâmetro do cabo de *Dyneema* é obtido o número máximo de *layers*,  $N_{layersmax}$ , que o tambor suporta:

$$N_{layersmax} = \frac{C}{\phi_{cabo}} = \frac{74}{6} = 12,3(3) = 12$$

Verifica-se assim que os guinchos têm capacidade para armazenar 12 *layers* de cabo *Dyneema* com 6 mm de diâmetro considerando que a folga entre a última *layer* e o topo da flange é a mínima possível.

Através do mesmo raciocínio levado para a construção da Tabela 5.12, para a *layer* número 12, teremos um diâmetro de *layer*,  $\phi_{12^{a}layer}$ , igual a 0,265 metros e um comprimento de cabo armazenado no tambor igual a 272 metros. Conclui-se assim que, mesmo não alterando os novos guinchos auxiliares, há possibilidade de aumentar o comprimento dos cabos auxiliares (quando necessário ou se pretenda) até um comprimento de, sensivelmente, 272 metros.



# 6

## **Sistemas de ligação e acoplamento dos balões à plataforma**

Neste capítulo é apresentado todo o raciocínio seguido no projeto dos componentes dos sistemas que garantem o acoplamento dos vários balões aos cabos principais e à plataforma. Estes sistemas são de elevada importância já que, independentemente dos processos efetuados para descolar e aterrar a plataforma, os balões têm sempre de ser acoplados e desacoplados a esta, obrigando assim à existência de sistemas que permitam estas mesmas operações.

Os sistemas de acoplamento terão de ter em consideração sobretudo as dimensões dos dois tipos de balões e o diâmetro dos cabos estruturais principais, que é fixo e igual a 6 mm. Estes conjuntos terão de assegurar também a continuidade dos cabos principais e uma fácil montagem e desmontagem, de modo a não dificultar em demasia o acoplamento e desacoplamento dos balões.

Depois de várias considerações e abordagens ao problema, foi decidido que os cabos auxiliares (pelos quais os balões são puxados e recolhidos) estariam ligados à zona mais resistente de cada balão, ou seja, ao bloco no centro dos topos dos balões. A decisão de recolher os balões puxando-os pela zona central dos blocos e não pelos bumeranges (primeira possível solução encontrada) foi tomada com o objetivo de evitar o aparecimento de esforços mais elevados e distintos (como a introdução de momentos) nestes últimos componentes. Sendo substancialmente menos resistentes que os blocos, os bumeranges são componentes projetados sobretudo para guiarem os cabos e impedir que estes toquem e rocem nos balões evitando o enrolamento e possíveis danos no sistema e nos próprios cabos.

É então pretendido utilizar uma peça de ligação e outra de fixação/ligação do *cable grip* por cada topo dos balões secundários. A peça de ligação será fixa e posicionada no bloco e será por ela que os balões serão puxados e recolhidos. Esta peça garante também a continuidade dos cabos principais. Já as peças de ligação do *cable grip* irão permitir a passagem dos cabos principais estando apenas encarregues do correto posicionamento do *cable grip* e do cabo auxiliar extra que servirá para fixar a estrutura durante a troca dos cabos auxiliares nos guinchos. Esta peça estará colocada na parte inferior dos bumerangues dos balões secundários.

No balão principal não são utilizadas peças de ligação do *cable grip* uma vez que não é necessário nem este último componente nem cabo auxiliar extra. No caso do balão do topo apenas existirá uma peça de ligação igualmente fixa na zona do bloco onde ligam as pontas superiores dos cabos principais. Todavia, dado que o balão principal é o único que faz sempre parte da plataforma, a peça de ligação é distinta da dos balões secundários tal como será apresentado mais adiante.

Estando perante o caso de uma plataforma constituída por múltiplos balões, é necessário avaliar os componentes já existentes, como o bloco e o bumerangue, com o objetivo de perceber se estes podem ser utilizados na nova configuração diminuindo assim os custos e necessidade de produção de novos componentes. Caso não seja possível a sua reutilização, os componentes sofrerão adaptações, porém, serão sempre efetuadas o mínimo de mudanças possíveis de modo a aproveitar tudo o que já foi desenvolvido pela empresa.

Para tornar mais simples e possível a visualização de todos os componentes dos sistemas, é utilizado o *software* de Desenho Assistido por Computador (CAD), *SolidWorks*.

O *SolidWorks* é um *software* de CAD que permite o projeto e a passagem rápida de ideias para sólidos em três dimensões. É um programa bastante utilizado em engenharia e tecnologia pela facilidade que oferece na modelação de componentes com dimensões pretendidas. É possível ainda produzir desenhos técnicos detalhados e fazer simulações e análises recorrendo, por exemplo, ao método dos elementos finitos [24].

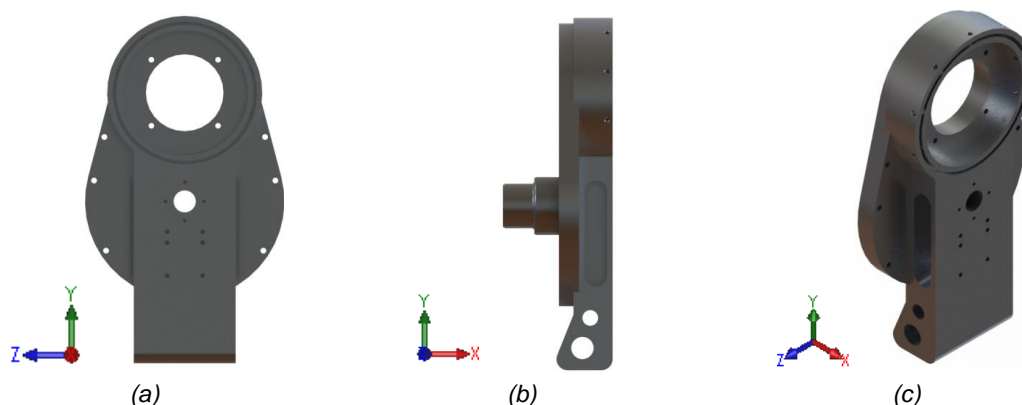
De seguida são detalhadas todas as considerações adotadas no projeto e na adaptação dos novos componentes dos sistemas de fixação e de acoplamento dos balões. São referidos também os critérios mais relevantes para a seleção de componentes no mercado quando for o caso. Todos os desenhos técnicos dos componentes dos sistemas de acoplamento dos balões à plataforma a produzir (ou adaptados) são apresentados no anexo J.

## 6.1 Bloco

Como já referido anteriormente, o bloco é o componente encarregue da proteção do sistema de engrenagens que fornece a rotação aos balões. A este bloco estão fixos os

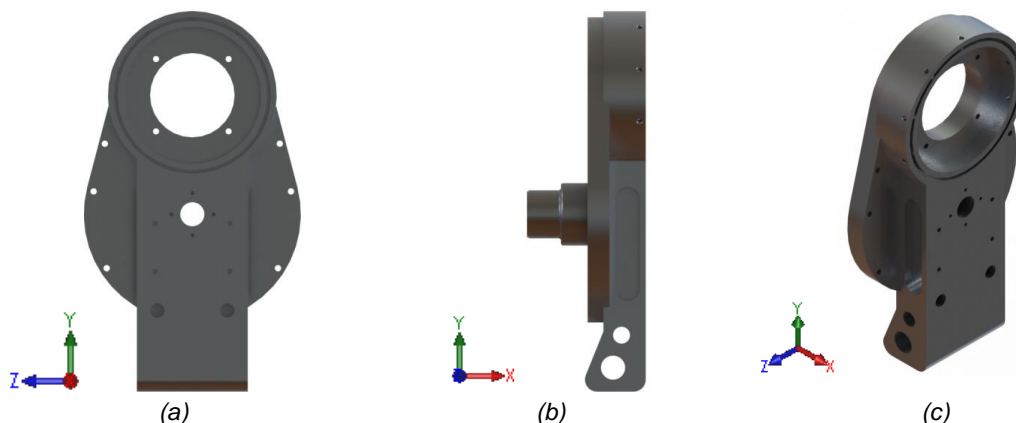
bumerangues e os próprios motores. O bloco é produzido em alumínio de liga 7075 com um revenido T6 aumentando assim a sua tensão de cedência. As ligas da série 7xxx são recorrentemente utilizadas na indústria aeronáutica e militar na produção de peças sujeitas a elevados esforços, sugerindo assim serem indicadas para o projeto da *Omnidea* [25]. No caso específico do alumínio 7075-T6, a sua tensão de cedência é igual a 480 MPa [26].

Uma vez que a empresa atualmente trabalha com uma plataforma constituída apenas pelo balão principal, o bloco atual apenas tem em consideração a existência deste mesmo balão. O atual bloco do balão principal está representado na Figura 6.1.



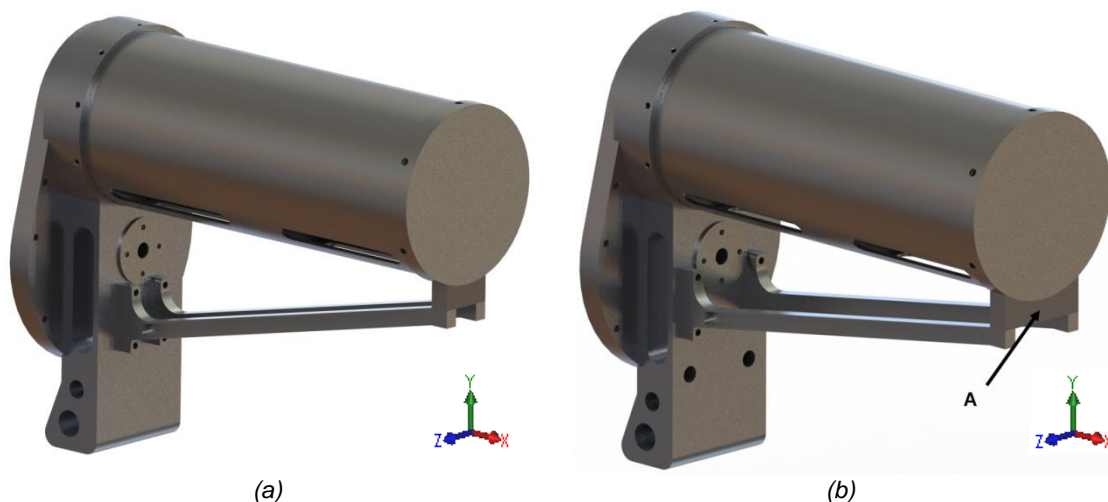
**Figura 6.1: Bloco atual do balão principal; (a) Vista de frente; (b) Vista lateral; (c) Vista em perspectiva.**

De modo a promover a fixação das peças de ligação onde são ligadas as pontas superior dos cabos principais, é necessário abrir dois furos no bloco de modo a permitir a ligação aparafusada que firma estas mesmas peças. Os componentes que suportam o motor necessitam então de ser encurtados passando a ser fixos mais a cima no bloco. O espaçamento entre os suportes é também aumentado. Na Figura 6.2 é possível observar quer os furos onde será fixa a peça que recebe cada um dos cabos principais quer os quatro novos furos com menor diâmetro onde serão fixos os suportes do motor. O novo bloco já alterado tem um peso de 3 kgf, isto é, sensivelmente 0,1 kgf a mais que o bloco original. Este pequeno aumento de peso é justificado por, apesar de serem abertos dois furos roscados no bloco, haver a diminuição da profundidade dos dois rasgos laterais de modo a tornar possível a abertura dos furos para fixação dos suportes do motor.



**Figura 6.2: Novo bloco do balão principal; (a) Vista de frente; (b) Vista lateral; (c) Vista em perspectiva.**

De modo a visualizar e a clarificar as novas posições dos suportes dos motores é apresentado na Figura 6.3 o bloco do balão principal atualmente existente e o bloco já alterado tendo em conta a fixação das peças onde ligam os cabos principais.



**Figura 6.3: Posições dos suportes do motor; (a) Bloco atual; (b) Bloco alterado.**

Com o aumento do espaçamento entre os suportes, o componente assinalado pela letra A na Figura 6.3 aumenta também de comprimento.

Uma vez alterado o bloco do balão principal, há a necessidade de projetar os blocos para os balões secundários. Partindo do componente já alterado, existem dois cenários distintos:

1. Bloco para balão secundário com rotação imposta;
2. Bloco para balão secundário sem rotação imposta.

De seguida são referidas as características destes dois tipos de blocos.

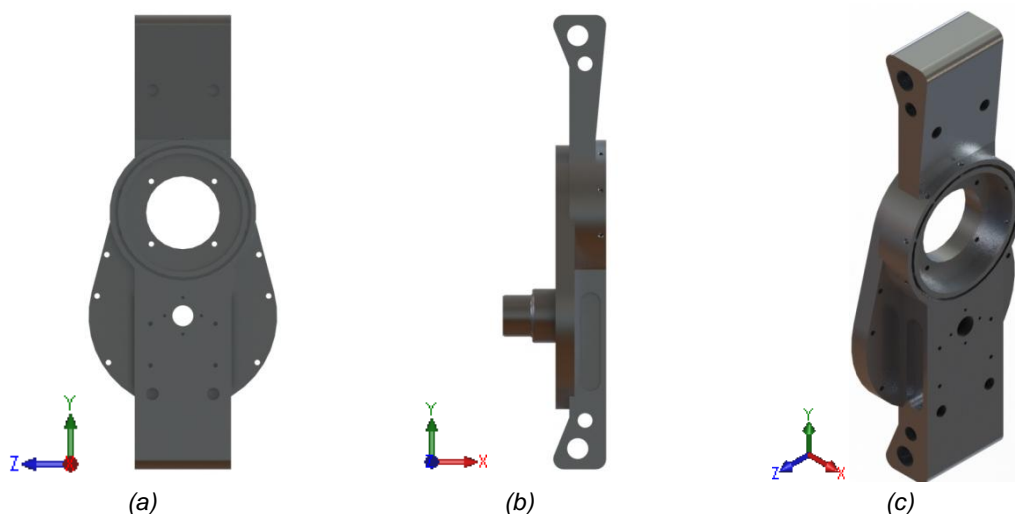
### **6.1.1 Bloco para balão secundário com rotação imposta**

No caso de um balão secundário com rotação imposta é necessário garantir que este dispõe de um bloco que permita a fixação do motor elétrico e do conjunto de engrenagens que fazem rodar a jante metálica. Tratando-se de um balão secundário, significa que terá sempre, pelo menos, um balão acima deste (balão principal ou restantes balões secundários) implicando assim que o bloco tenha de permitir a fixação do bumerangue não só na sua parte inferior mas também na parte superior de modo a tornar possível a passagem e o encaminhamento dos cabos principais para o balão seguinte. Assim, conclui-se também desde logo que os balões secundários são sempre obrigados a ter em cada topo, dois bumerangues de modo a direcionar os cabos principais.

Tendo rotação imposta, a geometria do bloco poderá ser bastante semelhante à do bloco do balão principal apresentado na Figura 6.2, todavia, devido às razões anteriormente



referidas, ao bloco terá de ser adicionada uma zona que permita a fixação do bumerangue superior. A geometria do bloco para um balão secundário com rotação imposta é então a representada na Figura 6.4.



**Figura 6.4: Bloco do balão secundário com rotação imposta; (a) Vista de frente; (b) Vista lateral; (c) Vista em perspectiva**

Observando a Figura 6.4, e comparando-a com a Figura 6.2, é possível observar a notória alteração da geometria do bloco com a adição da saliência onde será feita a ligação do bumerangue superior. Esta nova geometria do topo do bloco, praticamente espelha a geometria da parte inferior do bloco, tendo de profundidade os mesmo 92 mm. Os diâmetros dos furos por onde passaram os pinos de fixação do bumerangue são também idênticos aos da zona mais baixa, tendo de diâmetro 14 e 20 mm. Os quatro furos onde serão colocadas as peças com olhais onde se fixam as peças de ligação dos cabos principais são idênticos e roscados de maneira a receberem quatro parafusos M12.

De salientar que no caso deste bloco a face da nova saliência vista de frente na Figura 6.4a não é completamente vertical, tal como é possível observar na Figura 6.4b. Esta inclinação na face tem como propósito garantir que a fixação da tampa de proteção do motor ao bloco continua a ser possível. Esta fixação é feita com os mesmos 7 parafusos M3,5, aproveitando assim os furos e dimensões já existentes do bloco atual, não havendo necessidade de repensar num novo método de imobilizar a proteção do motor.

O material deste novo bloco continua a ser alumínio 7075-T6, havendo porém um aumento de 0,96 kgf quando comparado com o do balão principal, ou seja, o peso deste bloco é de, sensivelmente, 3,96 kgf.

Este aumento de peso tem origem no facto do bloco para um balão secundário com rotação imposta ser, dos três cenários, o que tem maior comprimento. Este fator é necessário de modo a garantir espaço para a fixação dos dois bumerangues e das duas peças de ligação que garantem a continuidade e ligação dos cabos principais que, neste caso, são obrigados a contornar o motor.

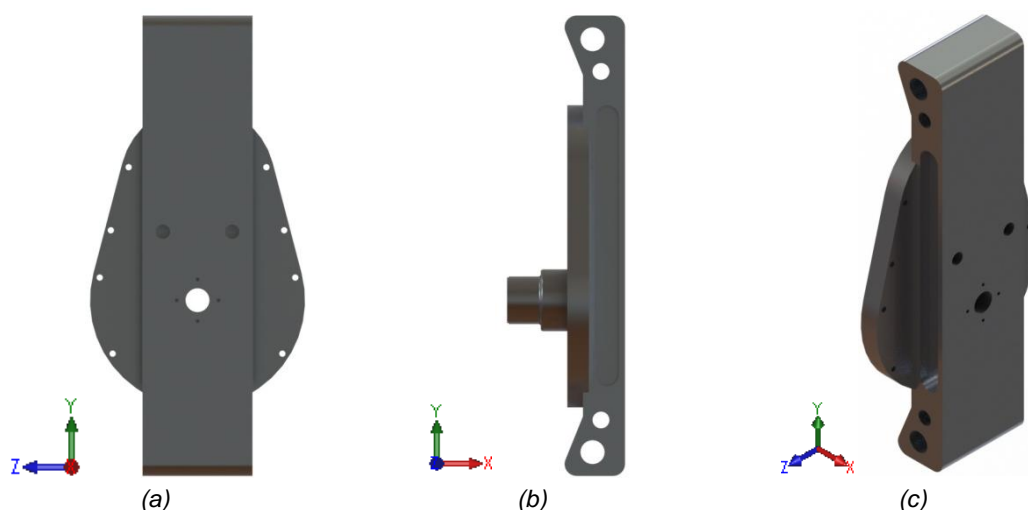
### 6.1.2 Bloco para balão secundário sem rotação imposta

Como já referido anteriormente e igualmente ao caso do bloco para os balões secundários com rotação imposta, o bloco para os balões secundários sem rotação terá de garantir a fixação dos bumerangues não só na parte inferior mas também na parte superior, permitindo assim a passagem e o direcionamento dos cabos principais para o balão seguinte. Este requisito é importante sempre que estamos perante balões secundários.

Para garantir a fixação dos bumerangues na parte superior dos blocos, é desenvolvida uma saliência idêntica à projetada para o caso dos blocos dos balões com rotação.

Apesar de ser instalado em balões secundários sem rotação imposta, é relevante que o bloco permita ao balão ser livre de rodar em torno do seu eixo. Esta característica é interessante já que pode ser utilizada para facilitar os processos de aterragem e descolagem, como por exemplo na colocação das cintas de segurança. Deste modo, a geometria do bloco pode ser simplificada no que diz respeito à zona de fixação do motor elétrico e engrenagens, porém, a zona do rolamento e da fixação à jante deverá ser mantida permitindo assim a rotação forçada manualmente do balão quando for oportuno e conveniente.

A geometria do bloco para um balão secundário sem rotação imposta é representada na Figura 6.5.



**Figura 6.5: Bloco de balão secundário sem rotação imposta; (a) Vista de frente; (b) Vista lateral; (c) Vista em perspetiva).**

Como é possível observar na Figura 6.5, o bloco para um balão secundário sem rotação acaba por ser maciço e sem a abertura para a ligação das engrenagens com o motor elétrico, uma vez que estes componentes não existem. O rasgo lateral, que é simétrico e comum em ambos os lados do bloco, continua a existir tendo um comprimento superior quando comparado com os outros dois tipos de blocos. A sua profundidade é 10 mm.

Quando comparado com o bloco da Figura 6.4 verifica-se que a inclinação na face vista de frente na Figura 6.4a deixa agora de existir passando a face corresponde do bloco para um

balão sem rotação a ser toda ela vertical. A justificação para tal é novamente o facto de não ser fundamental a conexão do motor e da sua proteção ao bloco uma vez que estes componentes não são sequer necessários.

O material do componente é o mesmo alumínio 7075-T6 já utilizado nos restantes blocos.

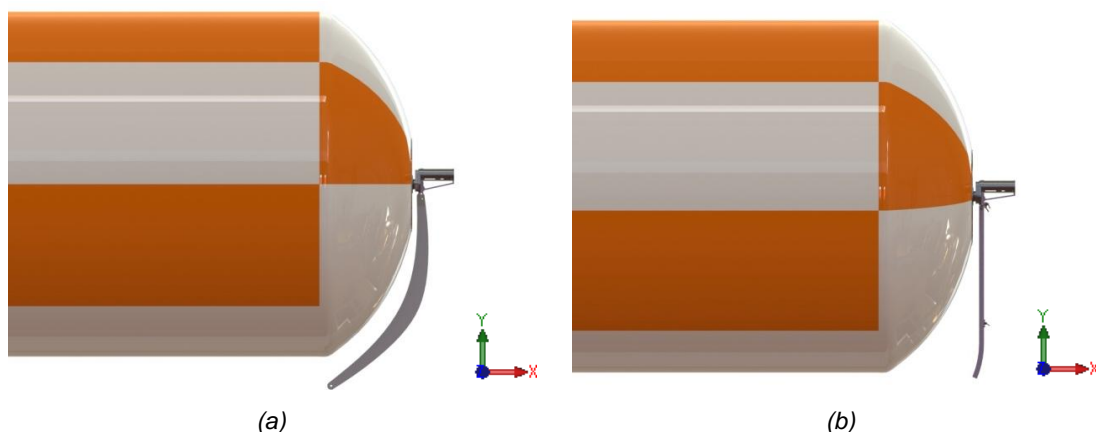
Em relação ao peso do bloco, este é de 3,94 kgf sendo superior quando comparado com o bloco do balão principal. A justificação para tal prende-se com o facto de, apesar de serem reduzidas superfícies e saliências, o bloco passar a ser maciço, provocando um aumento do peso.

Projetados os três tipos de blocos distintivos, estes devem ser sempre escolhidos de forma adequada tendo em conta o tipo de balão (principal ou secundário) e, no caso de ser um balão secundário, se tem rotação ou não. A correta escolha e utilização dos blocos permitirá à empresa levar a cabo os seus objetivos independentemente dos tipos de balões que constituam a plataforma.

## 6.2 Bumerangues

Os bumerangues são os componentes fixos nas extremidades dos blocos dos balões. Atualmente estes elementos têm como função a criação de um momento contrário àquele que é imposto pelo sistema de rotação evitando deste modo o enrolamento dos cabos nesta área. Compostos por duas chapas de alumínio com uma camada de espuma de poliuretano entre elas, os bumerangues apresentam um baixo peso e uma geometria curva desde do ponto do bloco onde são fixos até à ponta onde os cabos principais são ligados. O uso desta geometria garante que os cabos principais não embatem no único balão que constitui a plataforma, sendo encaminhados até ao *Bridle Point* sem qualquer problema.

No caso de uma plataforma constituída por múltiplos balões, os bumerangues têm de ser alterados e passar a ter uma geometria com uma curvatura menos acentuada, uma vez que é necessário que os cabos principais sejam encaminhados verticalmente para os balões inferiores e superiores. No caso dos balões secundários é necessário ainda adicionar um bumerangue na parte superior dos blocos. Na Figura 6.6 é possível verificar as diferenças entre o bumerangue do balão principal para o caso onde a plataforma é constituída por apenas um balão (caso atual) e para o cenário onde são utilizados vários balões.



**Figura 6.6: Diferença entre bumerangue atual e alterado; (a) Bumerangue de um dos topos do balão principal para o caso onde a plataforma é constituída por apenas um balão (caso atual); (b) Bumerangue para o cenário onde são acoplados balões secundários.**

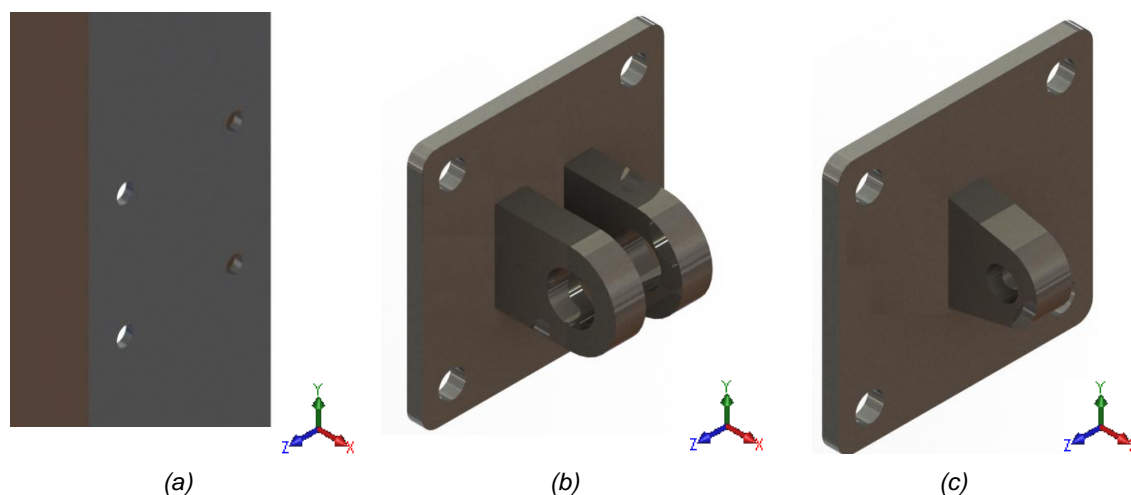
Verifica-se então que a geometria dos novos bumerangues será praticamente toda ela vertical com apenas uma curvatura na extremidade oposta à que liga no bloco. Na extremidade que fica em contacto com os blocos existem dois furos passantes de diâmetro 14 e 20 mm por onde são feitos passar pinos que garantem a fixação dos bumerangues ao bloco e o seu correto posicionamento no sistema. Estes pinos são fixos e impedidos de se deslocarem axialmente através de freios circulares exteriores que são encaixados em ranhuras cavadas nos veios. Os freios utilizados seguem a norma DIN 471 e têm, para o pino de 14 e 20 mm, respetivamente, a descrição de 14x1 e 20x1,2.

Todos os bumerangues são obtidos através de perfis em U de alumínio 6063-T5 com dimensões 100x50x4 mm assegurando deste modo um baixo peso dos componentes e uma boa resistência à corrosão. Através de corte por arrombamento são realizados os furos por onde passam os pinos de fixação e o arredondamento dos cantos da extremidade que liga ao bloco. A curvatura da extremidade inferior é obtida posteriormente por calandragem. Porém, tal como os blocos, os bumerangues também variam conforme sejam para instalar no balão principal ou nos balões secundários. A variação todavia é apenas no comprimento dos componentes e no raio de curvatura das extremidades curvas. Na Figura 6.7 são apresentadas as dimensões dos bumerangues tendo em conta o tipo de balão e, no caso do balão secundário, se são para instalar na extremidade superior ou inferior dos blocos.

Tipo de balão e bumerangue		$H_{\text{bumerangue}}$ [mm]	$H'_{\text{bumerangue}}$ [mm]	$R_{\text{bumerangue}}$ [mm]
Balão principal	Bumerangue superior	-	-	-
	Bumerangue inferior	1780	1420	875
Balão secundário	Bumerangue superior	1208	950	775
	Bumerangue inferior	1458	1200	775

**Figura 6.7: Dimensões dos bumerangues conforme o tipo de balão e local de instalação.**

A necessidade do bumerangue inferior dos balões secundários ter um maior comprimento que o superior prende-se com o facto de ser necessário garantir uma determinada distância (aproximadamente 900 mm) desde do ponto de fixação do *cable grip* até ao local onde a peça de ligação é fixa no bloco, impedindo assim que a rede do *cable grip* interseje a peça de ligação. A fixação do *cable grip* é feita com o auxílio de peças de ligação que por sua vez são fixas ao bumerangue por uma outra peça com olhais. A fixação das peças com olhais é assegurada por ligações aparafusadas onde são utilizados quatro parafusos M8. Deste modo há a necessidade de abrir nos bumerangues quatro furos com 9 mm de diâmetro para permitir a fixação destes componentes. Apesar dos *cable grip* apenas serem utilizados nos bumerangues inferiores dos balões secundários, tanto nos bumerangues superiores dos balões secundários como nos do balão principal, são também realizados os quatro furos uma vez que nestes elementos são fixas outras peças com apenas um olhal onde são ligadas manilhas com o objetivo de encaminhar os cabos. Os furos a realizar nos bumerangues e as peças com olhais são visíveis na Figura 6.8.



**Figura 6.8:** Bumerangue e peças a fixar neste; (a) Furos a realizar nos bumerangues; (b) Peça com dois olhais para fixar *cable grip*; (c) Peça com um olhal onde liga uma manilha.

No anexo D é apresentado um fluxograma que sintetiza o projeto dos bumerangues.

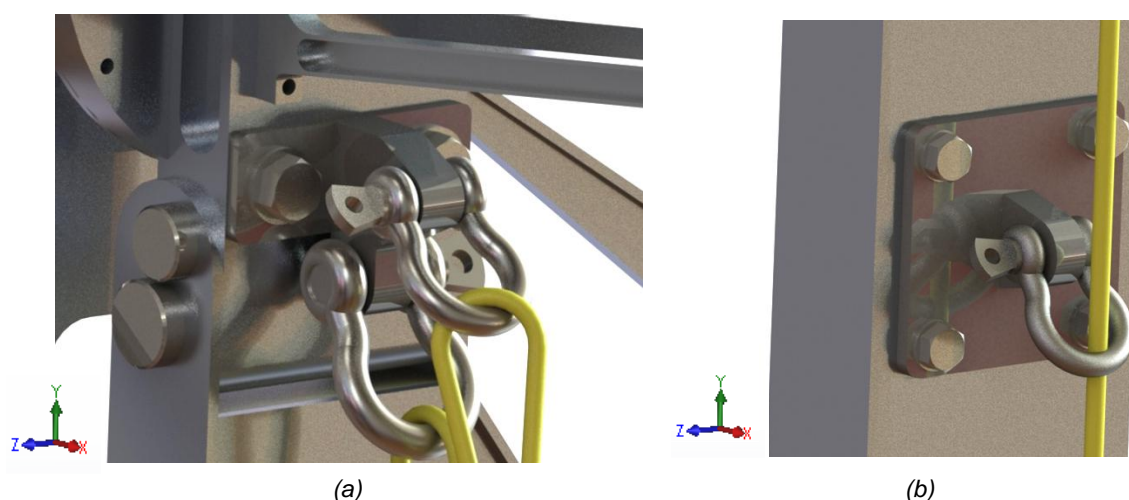
## 6.3 Peças de ligação e *cable grip*

### 6.3.1 Peças de ligação dos cabos principais aos blocos

Para assegurar o acoplamento dos balões à plataforma, é necessário recorrer a peças de ligação que permitam unir os cabos principais aos blocos dos balões e segurar e posicionar os *cable grip* nos bumerangues inferiores no caso dos balões secundários. Os cabos principais, auxiliares e auxiliares extra são ligados às peças de ligação através de manilhas que variam em termos de dimensões e resistência conforme o tipo de cabo com que se relacionam. Todas as manilhas utilizadas são do fabricante *Crosby*.

Para o caso do balão principal, dado o facto deste fazer sempre parte da plataforma e não necessitar de ser acoplado e desacoplado desta, a peça de ligação que é fixa ao bloco apresenta uma configuração distinta da dos balões secundários. Neste cenário, a peça terá uma disposição que a permite fixar ao bloco através de dois parafusos M12 ao mesmo tempo que possibilita a adição de duas manilhas para ligar os cabos principais e os auxiliares (Figura 6.9a). A escolha das manilhas a utilizar tem por base a força que é necessário suportar por parte dos cabos. No caso do balão principal, no cenário mais desfavorável, a força de tração dos cabos principais ronda os 14088,13 N (com  $U_{\infty}=18$  m/s e  $\omega=70$  RPM) e dos auxiliares 12170,97 N. Com estas informações foram escolhidos, respetivamente, os modelos G-209A 7/16 e G-209A 3/8 que suportam uma carga máxima de 26160 N e 19620 N respetivamente, garantindo deste modo, não só suportar os esforços aplicados como uma margem de segurança adequada [27]. As dimensões de todas as manilhas utilizadas são apresentadas no anexo F.

Na extremidade inferior do bumerangue do balão principal, depois de fixada a peça com um olhal, é utilizada uma manilha G-209 5/16 (Figura 6.9b) que tem como função garantir o constrangimento dos cabos principais e assegurar o seu correto encaminhamento para o balão secundário a baixo.



**Figura 6.9: Peças de ligação e peça com um olhal do balão principal; (a) Peça de ligação fixa no bloco do balão principal; (b) Peça com um olhal e manilha G-209 5/16 para encaminhamento do cabo principal colocada na extremidade do bumerangue.**

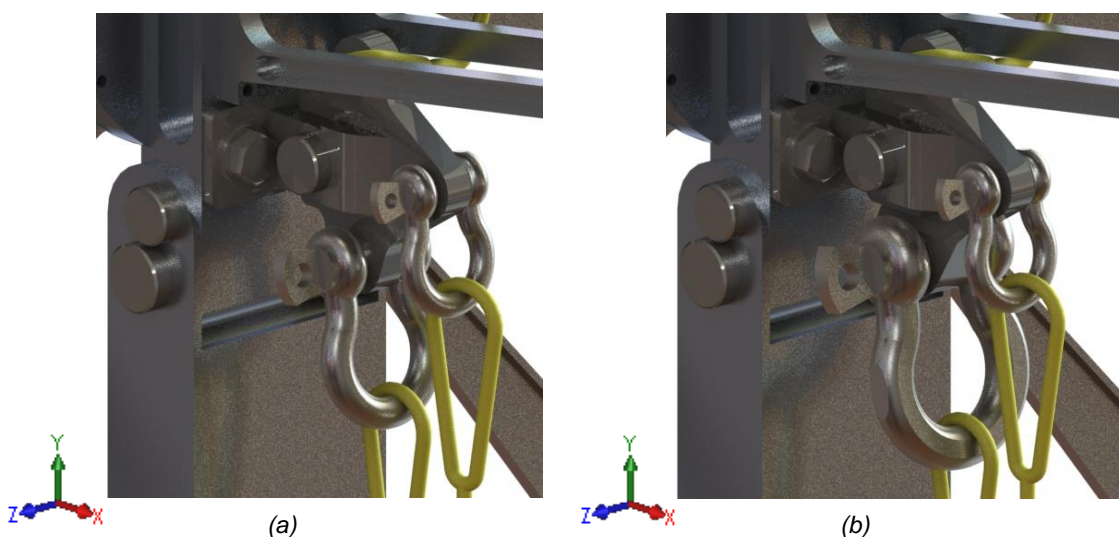
No que diz respeito aos balões secundários, independentemente de terem rotação imposta ou não, a peça com um olhal e a manilha apresentada na Figura 6.9b são comuns a ambos estando posicionadas perto da extremidade curva do bumerangue superior.

No que toca à peça de ligação usada para acoplar os balões à plataforma, esta é fixa aos blocos dos balões e tem, como já referido, uma configuração distinta da usada no balão principal. Para os balões secundários, a peça de ligação usada apresenta três olhais onde são ligadas um mesmo número de manilhas, no caso do balão sem rotação, ou apenas duas se o balão tiver rotação. Independentemente do número de manilhas, as colocadas lateralmente,

para segurar os cabos auxiliares, seguem o modelo G-209A 3/8 e as fixas no topo superior o modelo G-209A 1/2. No que toca às manilhas fixas no topo inferior das peças de ligação, estas podem ser do modelo G-209A 1/2 ou, em caso extremo, do modelo G-209A 5/8. A razão para a utilização de duas possíveis manilhas para uma mesma ligação prende-se pelo facto das manilhas do modelo G-209A 1/2 apenas suportarem uma carga limite de trabalho igual a 32700 N, valor este, inferior à força de tração (36896,16 N) que atua em cada um dos cabos do par que liga o balão secundário com rotação ao *Bridle Point* no cenário extremo de uma plataforma constituída por quatro balões com rotação e velocidade do vento e velocidade angular iguais a, respetivamente, 18 m/s e 40 RPM (o cálculo do valor referido é demonstrado no subcapítulo 6.4.1). É escolhido as manilhas do modelo G-209A 5/8 uma vez que estas toleram uma carga máxima de 49050 N.

Deste modo, sempre que a empresa optar pela utilização de uma plataforma constituída por quatro balões com rotação imposta, é recomendado, sobretudo por razões de segurança, que a manilha posicionada mais a baixo no sistema de acoplamento do balão mais perto do solo seja uma do modelo G-209A 5/8. Em qualquer outro cenário, isto é, para uma plataforma constituída por três ou menos balões, ou quatro balões entre eles secundários sem rotação, não há necessidade de diferenciar as manilhas, podendo ser utilizado manilhas todas idênticas e do modelo G-209A 1/2.

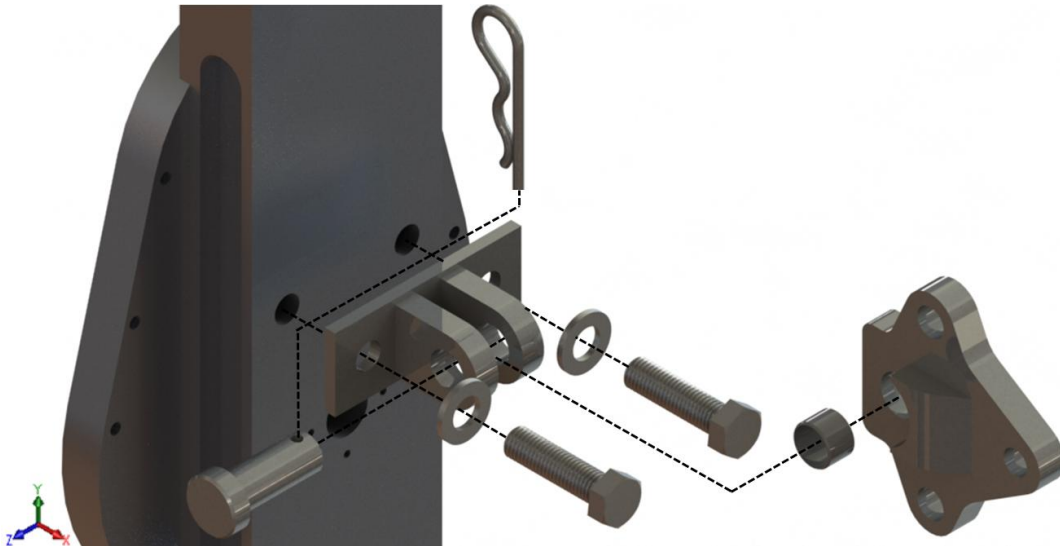
Dadas as dimensões de uma manilha do modelo G-209A 5/8 serem superiores às dos modelos inferiores, a possível necessidade de utilização deste modelo de manilhas promove que seja igualmente necessário utilizar peças de ligação distintas das utilizadas regularmente. Deste modo, é projetado uma peça de ligação com uma espessura e diâmetro do olhal inferior superiores às das peças de ligação mais utilizadas. Na Figura 6.10 é possível verificar a diferença entre o sistema compostos por uma manilha G-209A 1/2 e uma peça de ligação comum e o sistema com a nova peça de ligação e com a manilha G-209A 5/8 a utilizar no caso extremo referido anteriormente.



**Figura 6.10: Sistema de acoplamento de um balão secundário com rotação; (a) Sistema composto por uma manilha G-209A 1/2 e peça de ligação comum; (b) Sistema composto pela peça de ligação reforçada e manilha G-209A 5/8 a utilizar no caso extremo.**



Independentemente da peça de ligação, esta terá sempre um furo de diâmetro 18 mm onde é colocado um casquilho e feito passar uma cavilha para ligar a peça a uma outra peça com olhais fixa ao bloco. Tal como no balão principal, são utilizadas ligações aparafusadas para fixar a peça com olhais ao bloco tal como apresentado na Figura 6.11 onde é possível observar todos os elementos no caso de um balão secundário sem rotação.



**Figura 6.11: Vista explodida da montagem da peça com olhais que permite a fixação da peça de ligação para acoplamento dos balões secundários à plataforma (bloco de um balão secundário sem rotação).**

Para o caso dos balões secundários com rotação imposta, uma vez que há a necessidade de adicionar o motor aos blocos, é requerida a utilização de duas peças de ligação semelhantes à apresentada na Figura 4.2 que se ligam aos blocos através de duas cavilhas e peças com olhais como é visível na Figura 6.12.

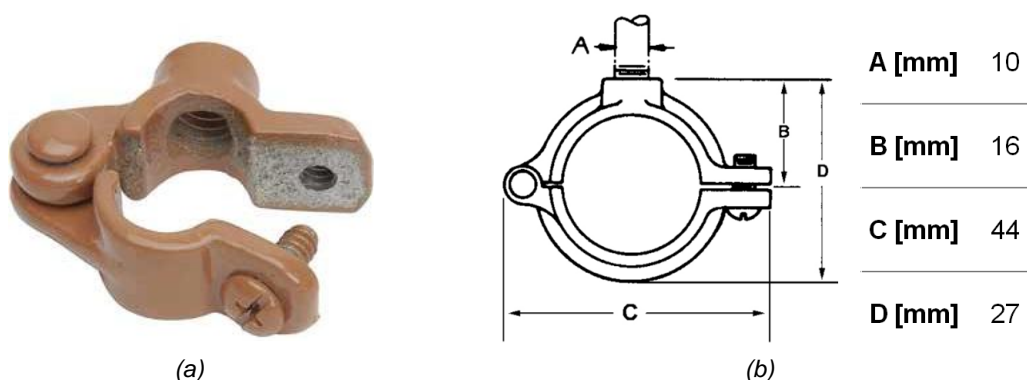


**Figura 6.12: Sistema de acoplamento comum aos balões secundários com rotação imposta com as peças de ligação e peças com olhais já montadas e fixas.**



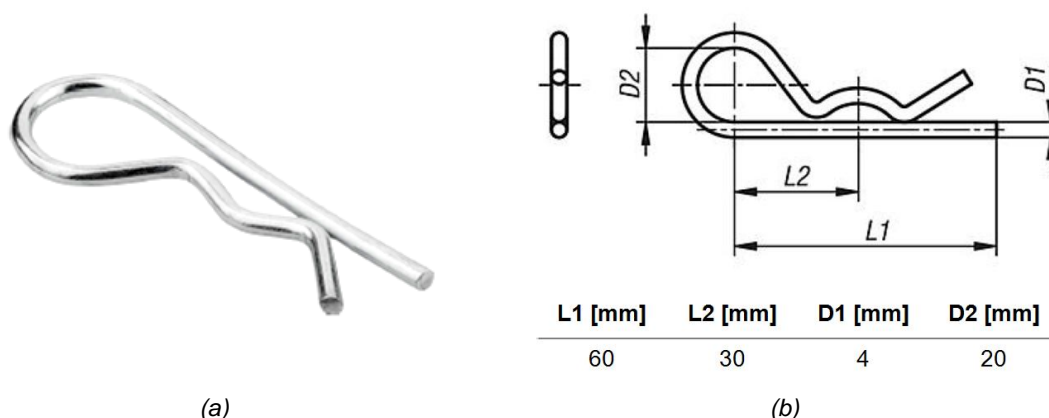
O recurso a duas peças de ligação prende-se com o facto dos cabos principais terem de contornar a proteção do motor, não podendo neste caso ser utilizado uma só peça como nos balões secundários sem rotação (Figura 6.11). Os cabos auxiliares estão desde início acoplados à manilha da peça de ligação inferior tal como apresentado na Figura 6.12 permitindo desde modo que os balões sejam recolhidos sem que haja a interseção destes cabos com os motores. A peça de ligação superior tem porém de possuir igualmente a manilha lateral de modo a possibilitar a troca de cabos auxiliares entre as peças, evitando assim esticões do cabo que garante a continuidade dos cabos principais. Estes cabos estão ligados às peças de ligação inferior e superior, respetivamente, no furo superior e inferior de cada uma.

Como se pode observar na Figura 6.12, é colocada uma abraçadeira em anel que força o cabo principal que liga as duas peças de ligação a contornar a proteção do motor. Vendida pela empresa *Global Industrial*, esta abraçadeira é utilizada sobretudo para suspensão de tubos e oferece uma ótima resistência à corrosão graças ao seu revestimento em cobre. A fixação do componente à proteção do motor é feita através de um parafuso M10x1,5 sendo utilizado um M5x0,8 para fechar a abraçadeira [28]. Na Figura 6.13 é possível observar a abraçadeira utilizada e algumas das suas dimensões mais relevantes.



**Figura 6.13: Abraçadeira fixa à proteção do motor; (a) Abraçadeira da empresa *Global Industrial*; (b) Dimensões mais relevantes (adaptado de [28]).**

Quer no caso onde os balões secundários têm rotação imposta quer no cenário onde isso não acontece, depois de feitas passar pelos olhais e peça de ligação, as cavilhas são sempre fixas e impedidas de se deslocarem axialmente através de troços de mola beta. O recurso a este tipo de componente prende-se sobretudo por estes serem facilmente montáveis e desmontáveis o que permite um rápido e simples acoplar e desacoplar dos balões à plataforma. Tendo em conta o diâmetro das cavilhas (16 mm), através do catálogo do fabricante alemão *Kipp*, foi escolhido o troço de mola beta mais adequado para o projeto. Optou-se então por um componente com espiral simples, produzido em aço inoxidável 1.4310 e com dimensões segundo a norma DIN 11024 [29]. Na Figura 6.14 é ilustrado o troço de mola beta escolhido e algumas das suas principais dimensões.



**Figura 6.14: Troço de mola beta; (a) Troço de mola beta utilizado na fixação das cavilhas; (b) Principais dimensões (adaptado de [29]).**

Para a correta instalação do troço de mola beta, o furo a realizar nas cavilhas deverá ter um diâmetro de 4,5 mm.

Para além de serem utilizados no constrangimento das cavilhas das peças de ligação centrais, são utilizados troços de mola beta também na fixação das cavilhas das peças de ligação dos *cable grips* e no acoplar do subsistema de ligação às torres da estrutura auxiliar como será apresentado no subcapítulo 7.3.2.

Os projetos da peça de ligação dos cabos auxiliares e principais e da do *cable grip* (apresentada no próximo subcapítulo) são resumidos no fluxograma presente no anexo E.

### 6.3.2 Escolha do *cable grip*

De modo a permitir a troca de cabos auxiliares nos respetivos guinchos durante os processos de descolagem e aterragem dos balões, nas zonas dos cabos principais que passam nas extremidades dos bumerangues inferiores dos balões secundários, são montados *cable grips* que são seguros por peças de ligação fixas ao próprio bumerangue.

Usados com diversos propósitos e disponíveis em várias configurações, os *cable grips* são componentes encontrados em sistemas que envolvam a instalação ou o controlo de, por exemplo, cabos elétricos, sendo usados sobretudo para puxar ou apoiar qualquer objeto cilíndrico (principalmente cabos) que possa ser colocado dentro da sua malha/manga.

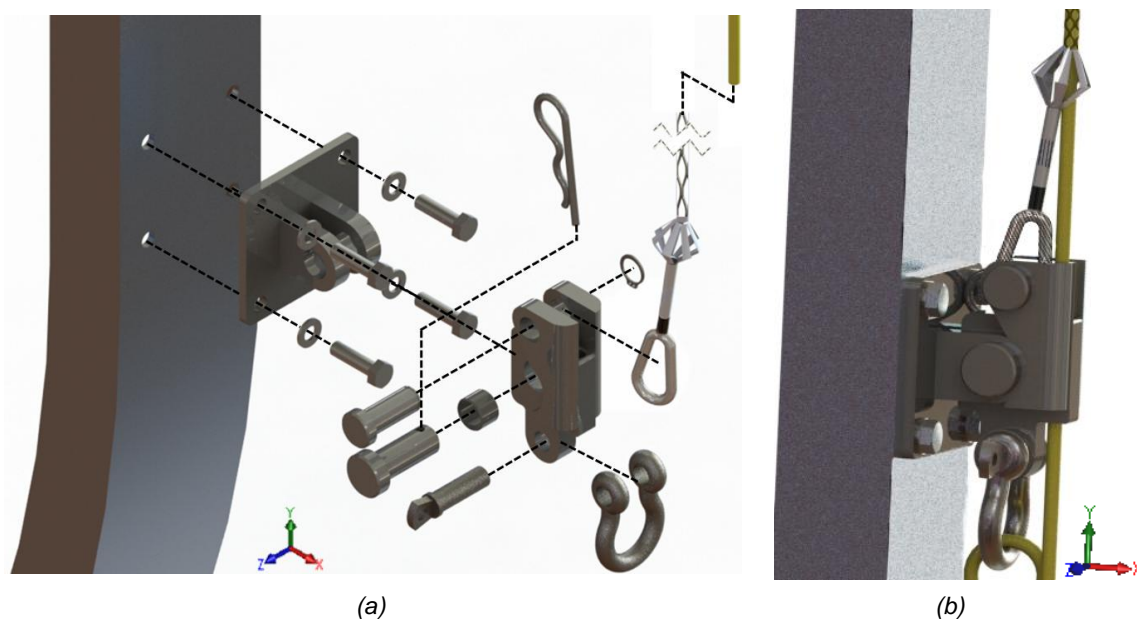
Tendo por base os valores do diâmetro do cabo principal e da força de tração a que estes são sujeitos no pior cenário possível (força a rondar os 7700 N uma vez que os *cables grips* apenas são requeridos quando a plataforma está a aterrar ou descolar (para chegar ao valor apresentado, foi levado um raciocínio idêntico ao do subcapítulo 5.3)), foi escolhido o *cable grip* mais adequado para o sistema da *Omnidea*. Optou-se então pelo modelo *A Type – High Strength Cable Grip* da empresa *Slingco* (Figura 6.15) em aço galvanizado uma vez que este permite trabalhar com cabos sintéticos com diâmetro de 6 mm, suportando inclusive cargas até 3180 kgf (31195,8 N), valor este superior ao exigido [30].



**Figura 6.15: Cable Grip do modelo A Type da empresa Slingco (adaptado de [30]).**

Com um comprimento total de 965 mm, a cor do tubo de alumínio que caracteriza o *cable grip* escolhido (dentro do seu modelo) é preto, tal como é visível na Figura 6.15.

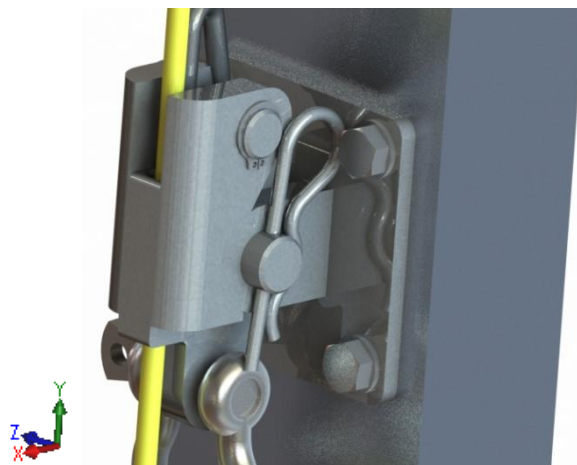
Uma vez montados os *cable grips* nos cabos, é importante garantir que estes últimos permanecem contínuos e são encaminhados para os balões secundários seguintes (ou *Bridle Point* no caso de ser o último balão) sendo então necessário que os cabos se libertem dos *cable grips* saindo destes pela zona dos ombros protetores (zona na extremidade final da rede). De modo a posicionar e a conter os *cable grips*, a extremidade em *loop* é segura pela passagem de uma cavilha na peça de ligação. Esta peça, por sua vez, também através de uma ligação com cavilha, é fixa à peça com dois olhais (Figura 6.8b) ficando deste modo solidária com o bumerangue inferior dos balões secundários. Na Figura 6.16 é possível visualizar a perspetiva explodida que representa a sequência de montagem do *cable grip* à peça de ligação e bumerangue. É possível observar também na mesma figura o sistema já corretamente montado.



**Figura 6.16: Sistema de fixação do cable grip e peça de ligação; (a) Vista explodida da montagem do cable grip à respetiva peça de ligação e bumerangue; (b) Sistema já montado.**

Na extremidade inferior da peça de ligação fixa ao bumerangue (onde o *cable grip* é montado), é colocada uma maninha G209A 3-8 onde é ligado o cabo auxiliar extra que segura a estrutura de modo a permitir a troca de cabos auxiliares nos guinchos. O raciocínio adotado para o cálculo do comprimento dos cabos auxiliares extras é apresentado no anexo G.

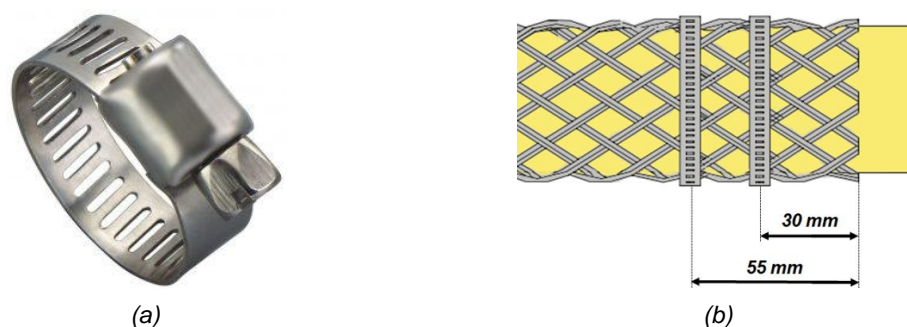
Uma vez que é pretendido que a montagem com cavilha da peça de ligação com a peça com olhais seja simples de desfazer, utiliza-se um troço de mola beta, tal como na zona dos blocos dos balões, para travar a cavilha. Já no caso da cavilha que segura a ponta em *loop* do *cable grip*, esta é impedida de ser movimentar através de um freio exterior (Figura 6.17).



**Figura 6.17: Modos distintos de fixação das duas cavilhas (troço de mola beta e freio circular exterior).**

Sobretudo por razões de segurança e para reforçar a montagem, é recomendado que sejam colocadas, pelo menos, duas abraçadeiras em torno da rede do *cable grip* uma vez feito passar e montado o cabo principal. As abraçadeira devem ser colocadas a uma distância de 30 mm e 55 mm desde do final da rede do *cable grip* [30].

Dado o diâmetro dos cabos principais, foi decidido utilizar abraçadeiras do modelo *M4S Micro Seal* da empresa *Precision Brand* que, para além de serem produzidas em aço inoxidável, apresentam um intervalo de diâmetros entre os 5,55 e 15,8 mm, sendo deste modo indicadas para fixação nos cabos principais (6 mm de diâmetro) e *cable grip* [31]. Na Figura 6.18 é apresentada a abraçadeira utilizada e o modo de instalação no *cable grip*.



**Figura 6.18: Abraçadeira e modo de montagem no sistema; (a) Abraçadeira *Micro Seal* da empresa *Precision Brand* [31]; (b) Modo de instalação no *cable grip* (adaptado de [30]).**

## 6.4 Dimensionamento de ligações e escolha de casquilho

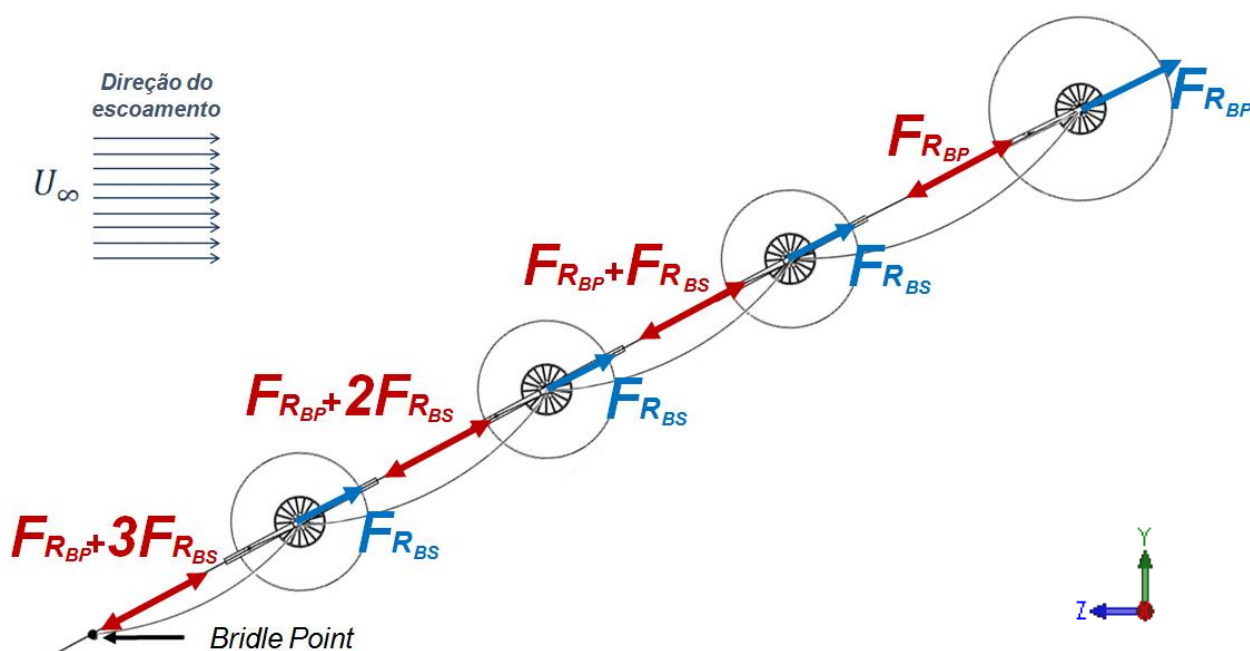
### 6.4.1 Determinação das forças que atuam no sistema

Para ser possível realizar o dimensionamento das ligações aparafusadas e com cavilhas que se encontram nos blocos dos vários balões, é importante determinar os cenários mais relevantes de estudo e os respetivos carregamentos a que os componentes ficam sujeitos.

Dada a disposição dos parafusos e da cavilha (utilizados na fixação das peças com olhais e de ligação aos blocos) e aos carregamentos a que estes são submetidos, verifica-se que existem dois casos principais relevantes de análise. Estes cenários são então durante o funcionamento da plataforma onde é aplicada uma força perpendicular aos eixos dos parafusos (força vertical) e quando os balões são recolhidos onde a força aplicada, apesar de ser inicialmente perpendicular, tende a ser paralela aos eixos dos parafusos (força horizontal).

De modo a chegar ao valor das forças que atuam nos elementos em cada um dos cenários apresentados, é necessário ter em conta as forças resultantes dos vários balões da plataforma e o valor máximo da força que os guinchos auxiliares realizam aquando da aterragem dos balões na estrutura auxiliar.

Para o cálculo da força resultante da plataforma é considerado o cenário mais desfavorável, isto é, uma plataforma constituída por quatro balões, todos eles com rotação imposta e com velocidade do vento e velocidade angular máximas (18 m/s e 70 RPM respetivamente). Neste cenário, as forças que atuam nos vários balões e nos cabos que ligam estes são representadas na Figura 6.19.



**Figura 6.19:** Forças resultantes que atuam em cada balão da plataforma e força de tração em cada par de cabos que ligam os vários balões.

Para obter as forças resultantes de cada um dos balões, são considerados os valores das forças de sustentação e de arrasto (Tabela 5.4) e da impulsão e do peso (Tabela 5.7). Recorrendo à equação (1.3) e tendo em consideração também a impulsão e peso de cada balão, vem para o balão principal (no cenário mais desfavorável):

$$F_{RBP} = \sqrt{(F_{LBP} + I_{BP} - P)^2 + F_{DBP}^2} = \sqrt{(24131,52 + 190 - 150)^2 + 14478,91^2} = 28176,25 \text{ N}$$

Por cabo, teremos então,  $F_{RBP}$  igual a 14088,13 N.

Para um balão secundário, recorrendo ao mesmo raciocínio vem:

$$F_{RBS} = \sqrt{(F_{LBS} + I_{BS} - P)^2 + F_{DBS}^2} = \sqrt{(13494,60 + 82,19 - 70,48)^2 + 9525,60^2} = 16527,48 \text{ N}$$

Por cabo, vem então,  $F_{RBS}$  igual a 8263,74 N.

Observando a Figura 6.19 verifica-se que a força de tração que cada cabo, dos pares de cabos que ligam o vários balões, é dada em função da força resultante do balão principal, dos balões secundários e do número de balões que constituem a plataforma. A força de tração por cada cabo,  $F_T$ , é então dada na equação (6.1).

$$F_T = \frac{F_{RBP} + (n - 1) \times F_{RBS}}{2} \quad (6.1)$$

Com  $F_{RBP}$  sendo a força resultante que atua no balão principal,  $F_{RBS}$  a força resultante que atua no balão secundário e  $n$  o número de balões que constituem a plataforma ( $n=1, 2, 3, 4$ )

Para o pior cenário possível (plataforma constituída por quatro balões com rotação e pares de cabos que ligam o balão secundário mais baixo ao *Bridle Point*), substituindo os valores na equação (6.1) vem:

$$F_T = \frac{F_{RBP} + 3 \times F_{RBS}}{2} = \frac{28176,25 + 3 \times 16527,48}{2} = 38879,35 \text{ N}$$

Analisando o valor obtido verifica-se que é superior a 37278 N (3,8 toneladas), valor este indicado no catálogo do fabricante como sendo o máximo que cada cabo suporta. Dado isto, verifica-se para este cenário que há a rotura dos cabos principais que ligam o balão secundário mais baixo ao *Bridle Point*. Deste modo, é necessário considerar para o pior cenário possível, velocidades angulares dos balões mais reduzidas (opta-se por variar as velocidades de rotação uma vez que estas podem ser controladas pelos operadores, ao contrário da velocidade do vento).

Assim sendo, passa a ser considerado como cenário mais desfavorável o caso onde a plataforma é formada por quatro balões com rotação imposta e com velocidade de vento e velocidade angular igual a, respetivamente, 18 m/s e 40 RPM.

Com base nas novas considerações, é possível obter os coeficientes de arrasto e sustentação para cada tipo de balão e assim calcular o valor das forças de sustentação, de arrasto e resultante (levando em consideração também a impulsão resultante e peso de cada balão). Todos estes valores são apresentados na Tabela 6.1.

**Tabela 6.1: Valores das forças resultantes dos dois tipos de balões com rotação imposta e velocidade do vento e velocidade angular iguais a 18 m/s e 40 RPM.**

	Coeficiente de arrasto	Coeficiente de sustentação	Força de arrasto [N]	Força de sustentação [N]	Força resultante [N]
<b>Balão principal</b>	1,2	1,8	14478,91	21718,37	26135,52
<b>Balão secundário</b>	1,2	1,6	12700,80	9525,60	15885,60

Substituindo os valores das forças resultantes da anterior tabela na equação (6.1), temos que a força de tração que atua em cada cabo que liga o balão secundário mais baixo ao *Bridle Point* é:

$$F_T = \frac{F_{RBP} + 3 \times F_{RBS}}{2} = \frac{26135,52 + 3 \times 15885,60}{2} = 36896,16 \text{ N}$$

Verificamos assim que o valor obtido é inferior ao máximo suportado pelos cabos (37278 N), demonstrando a importância da redução da velocidade angular dos balões em período de grandes velocidades de vento. Este cenário continua porém a ser um caso bastante desfavorável e desaconselhado uma vez que a força resultante que a plataforma origina aproxima-se bastante da suportada pelos cabos. Todavia, em cálculos futuros de dimensionamento de ligações, para o cenário de funcionamento da plataforma (aplicação de força vertical), será utilizado o último valor calculado. No que toca às simulações, consoante o tipo de sistema e de balão que se está a estudar, o valor a utilizar poderá variar tal como será visto no subcapítulo 6.5.

Já no cenário onde os balões são recolhidos, no cenário mais desfavorável, isto é, quando os cabos auxiliares ficam praticamente paralelos com o chão, a força exercida nos parafusos e cavilha é também ela praticamente paralela ao solo e horizontal.

Como será apresentado no subcapítulo 7.5.1, o valor máximo da força que os guinchos auxiliares realizam aquando da aterragem dos balões na estrutura auxiliar é de 12170,97 N, sendo esta força uma resultante das três componentes na direção de cada um dos eixos, ou seja, o valor da força na direção do eixo *X* (componente paralela ao solo e que interessa para o dimensionamento das ligações) será sempre menor que a resultante. Mesmo assim, o dimensionamento das ligações é realizado para o valor de 12170,97 N, garantido deste modo uma margem de segurança extra.

### 6.4.2 Ligações aparafusadas

Para dimensionar as ligações aparafusadas é considerado o pior cenário possível, isto é, as ligações dos elementos do bloco do balão secundário mais perto do solo, onde a força de tração em cada cabo principal é a mais elevada. Caso as ligações suportem os esforços a que ficam sujeitas neste cenário, há a garantia que suportam igualmente os esforços a que ficam sujeitas em situações mais favoráveis, onde a força de tração seja menor.

Para poder ser realizado o dimensionamento das ligações aparafusadas (visíveis na Figura 6.11 e Figura 6.12), é necessário desde logo definir a classe de resistência dos parafusos a utilizar. A classe de resistência caracteriza as tensões de rotura e de cedência de um dado elemento roscado, sendo dependente do material de fabrico desses mesmos elemento [32]. Disponível em anexo, a Tabela H1 apresenta os valores das tensões de rotura e de cedência para parafusos, porcas e pernos em função da classe de resistência. Para o projeto em causa é considerado uma classe de resistência 10.9, ou seja, uma tensão admissível,  $\sigma_{ADMp}$ , igual a 658 MPa.

Para o cenário onde a força exercida é perpendicular aos eixos dos parafusos, é importante garantir que a ligação aparafusada resulte do atrito entre os dois elementos comprimidos. Para isso é importante respeitar a relação  $F_{pp} \leq \mu \times N$  sendo  $F_{pp}$  a força aplicada perpendicularmente aos eixos,  $\mu$  o coeficiente de atrito entre os componentes e  $N$  a força de tração no parafuso. Admitindo um coeficiente de atrito igual a 0,61 (aço-alumínio) e tendo em conta que são usados dois parafusos, vem que a força de tração em cada um destes é:

$$N \geq \frac{F_{pp}}{\mu \times 2} = \frac{36896,16}{0,61 \times 2} = 30242,75 \text{ N}$$

Conhecendo a força de tração mínima por parafuso, é possível determinar a área resistente através da relação com a tensão normal no parafuso. Admitindo que a tensão normal do parafuso é igual à tensão admissível,  $\sigma_{ADMp}$ , vem que a área resistente necessária por parafuso é:

$$A_{res} = \frac{N}{\sigma_{ADMp}} = \frac{30242,75}{658 \times 10^6} = 4,596 \times 10^{-5} \text{ m}^2 = 45,96 \text{ mm}^2$$

Uma vez que são utilizados parafusos com passo fino, através da Tabela H2 em anexo, é verificado que é necessário utilizar parafusos com um diâmetro nominal mínimo igual a 10 mm. Apesar do caso de estudo ser bastante pessimista, é decidido utilizar dois parafusos M12 disponíveis por vários fabricantes na classe pretendida [33, 34] garantindo deste modo também uma segurança extra.

Caso os parafusos aliviem e deixem de comprimir a peça com os olhais contra o bloco dos balões, os parafusos passam a estar sujeitos a esforços de corte exercendo nas peças uma força que estas necessitam de suportar. Surge então neste cenário a chamada tensão de esmagamento  $\sigma_e$  (dada pela equação 6.2) que leva em consideração a área da superfície



interna de um meio cilindro de diâmetro igual ao do parafuso e comprimento igual à espessura da peça com os olhais.

$$\sigma_e \geq \frac{F_{pp}}{d_p \times e} \quad (6.2)$$

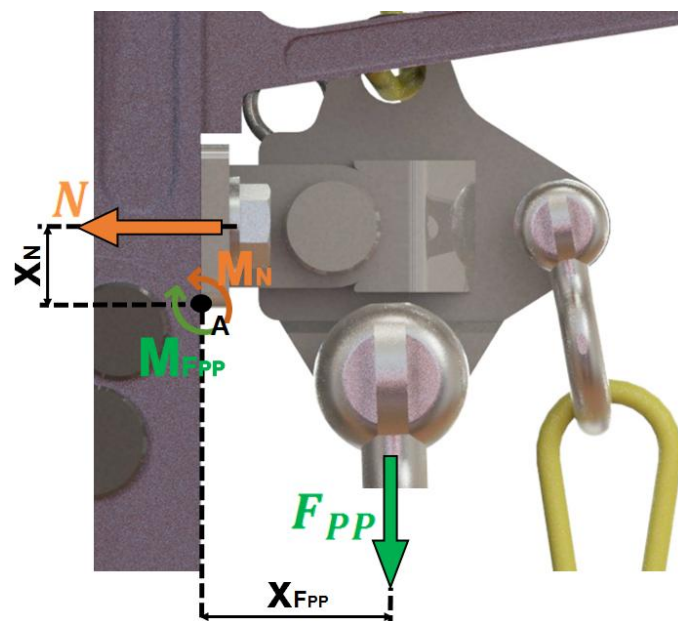
Com  $F_{pp}$  sendo a força aplicada perpendicularmente aos eixos dos parafusos,  $d_p$  o diâmetro do parafuso e  $e$  a espessura da peça com os olhais .

Dado ao facto de ser constituída por aço CK45, o componente menos resistente é a peça com os olhais, sendo considerado então uma tensão de esmagamento igual a metade da tensão de cedência deste componente, ou seja,  $\sigma_e = \sigma_{ADM_{po}} = 225 \text{ MPa}$ . Como são utilizados dois parafusos vem então que a espessura mínima da peça é:

$$e \geq \frac{F_{pp}}{2 \times d_p \times \sigma_{ADM_{po}}} = \frac{36896,16}{2 \times 0,012 \times (225 \times 10^6)} = 6,83 \times 10^{-3} \text{ m} = 6,83 \text{ mm}$$

Tendo em conta o valor obtido, foi determinado que o valor da espessura da chapa da peça dos olhais seria de 7 mm. A opção por um valor de espessura da chapa não muito superior ao mínimo exigido, prende-se sobretudo pelo facto do caso em estudo ser, como já referido, bastante adverso.

Dado que a força perpendicular aos eixos dos parafusos não é aplicada diretamente e alinhada com a zona da peça com olhais em contacto com o bloco, há o aparecimento de um momento que promove a rotação da peça com olhais em torno de uma aresta. O papel dos parafusos neste cenário é também bastante importante uma vez que é a força de tração destes que origina o momento contrário que impede a rotação da peça. Na Figura 6.20 são representados os braços e forças que originam os momentos em torno do ponto A da peça com olhais.



**Figura 6.20: Momentos sobre a peça com dois olhais originados pela força de tração nos parafusos e força perpendicular aos eixos destes.**

Tendo em conta que o momento de uma força em relação a um ponto é definido pelo produto dessa mesma força e o braço entre a linha de ação da força e o ponto, vem que o momento da força perpendicular ao eixos dos parafusos,  $M_{PP}$ , é dado por:

$$M_{PP} = F_{pp} \times x_{PP} \quad (6.3)$$

Com  $F_{pp}$  sendo a força aplicada perpendicularmente aos eixos dos parafusos e  $x_{PP}$  a distância entre a linha de ação da força e o ponto A.

Através do *software SolidWorks* é possível encontrar o comprimento  $x_{PP}$  sendo este igual a 46,5 mm. Deste modo, substituindo os valores da força e braço na equação (6.3) vem:

$$M_{PP} = 36896,16 \times 0,0465 = 1715,67 \text{ Nm}$$

Determinado o momento que provoca a rotação da peça com olhais em torno do ponto A, é importante garantir que o momento originado pela força de tração dos parafusos,  $M_N$ , no pior dos cenários, o iguala. Sabendo, através do *software SolidWorks*, que o comprimento  $x_N$  é igual a 20 mm, substituindo os valores respetivos na equação (6.3) vem:

$$M_N = N \times x_N \Leftrightarrow N = \frac{M_N}{x_N} = \frac{1715,67}{0,020} = 85783,57 \text{ N}$$

Uma vez conhecida a força de tração que o par de parafusos tem de garantir, relembando que se está a utilizar dois parafusos com uma classe de resistência 10,9 ( $\sigma_{ADM_p}$  igual a 658 MPa) vem que a área resistente necessária por parafuso é:

$$A_{res} = \frac{\frac{N}{2}}{\sigma_{ADM_p}} = \frac{\frac{85783,57}{2}}{658 \times 10^6} = 6,519 \times 10^{-5} \text{ m}^2 = 65,19 \text{ mm}^2$$

Através da Tabela H2 em anexo, vemos que são necessários parafusos de tamanho mínimo M12. Uma vez que este é um caso bastante desfavorável e incomum e que cada parafuso M12 garante uma área de secção resistente a rondar os 92 mm<sup>2</sup> (bastante superior ao requerido) o recurso a dois parafusos M12 anteriormente definida, pode continuar a ser admitida e utilizada.

Quando os balões são recolhidos, no cenário mais desfavorável, isto é, quando os cabos auxiliares ficam praticamente paralelos com o chão, a força exercida nos parafusos é também ela praticamente paralela aos eixos destes. Neste cenário é preciso então verificar se a área de secção dos parafusos é suficiente e se não existe arrancamento dos filetes.

Como referido no subcapítulo anterior, o valor da força a considerar neste cenário ronda os 12170,97 N, sendo que, uma vez que este valor é menor que o valor da força que é exercida perpendicularmente aos eixos dos parafusos (36896,16 N) é possível desde logo concluir que a área resistente mínima necessária será inferior à calculada anteriormente, assegurando deste modo que a escolha de parafusos M12 garante uma grande margem de segurança.

No que toca à tensão de corte nos filetes dos fusos, uma vez que se está a trabalhar com roscas triangulares, o diâmetro dos parafusos pode ser calculado com base na equação 6.4 [32]:

$$d_p \geq \frac{F_p}{\frac{7\pi}{16} \times H \times \sigma_{ADM_{po}}} \quad (6.4)$$

Com  $d_p$  sendo o diâmetro do parafuso,  $F_p$  a força aplicada paralelamente aos eixos dos parafusos,  $H$  o comprimento do fuso e  $\sigma_{ADM_{po}}$  a tensão admissível da peça com os olhais (por ser o componente menos resistente).

Considerando um comprimento roscado de 20 mm, força aplicada igual à resultante que os guinchos realizam (sobredimensionamento) e tensão admissível da peça com os olhais,  $\sigma_{ADM_{po}}$ , novamente metade da tensão de cedência deste componente, usando dois parafusos vem:

$$d_p \geq \frac{12170,97}{2 \times \frac{7\pi}{16} \times 0,020 \times (225 \times 10^6)} = 9,8 \times 10^{-4} \text{ m} = 0,98 \text{ mm}$$

Analisando o resultado obtido para o diâmetro mínimo dos parafusos verifica-se que é um resultado que fisicamente não faz sentido. É possível admitir assim que a utilização de dois parafusos M12 com um comprimento roscado de 20 mm é mais que suficiente, garantido as necessidades e segurança do sistema. A razão para o valor do diâmetro mínimo obtido ser tão pequeno estará relacionado com o comprimento do fuso relativamente elevado e pelo facto de serem utilizados dois parafusos.

### 6.4.3 Ligação com cavilha

Uma vez fixa a peça com olhais ao bloco dos balões, para juntar a peça de ligação a esta (e assim acoplar os balões secundários à plataforma) é utilizada uma ligação com cavilha sendo deste modo também necessário o seu dimensionamento.

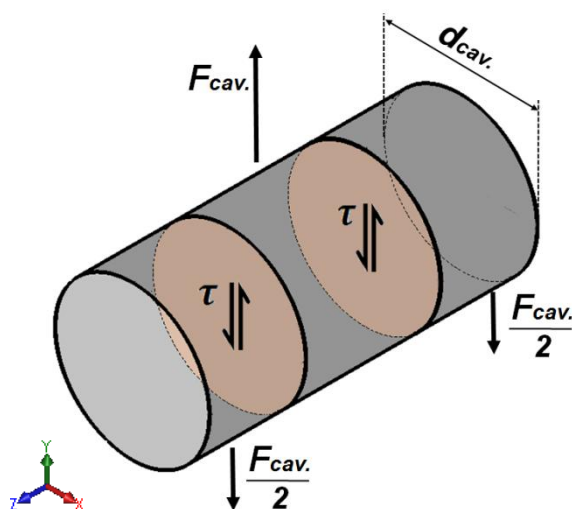
No dimensionamento deste tipo de ligações é comum considerar apenas as tensões resultantes do funcionamento normal da ligação, desprezando as tensões resultantes dos processos de montagem. Assim sendo, as tensões relevantes a verificar são as tensões de corte nas secções da cavilha que se encontrem na transição entre as peças a ligar e as tensões normais na cavilha e nas peças a ligar [32]. Para este último cenário, é necessário levar em consideração o material tanto da cavilha como das duas peças a ligar. Como para a cavilha é escolhido utilizar o mesmo aço de carbono CK45 (típico em órgãos de máquinas graças às suas boas propriedades mecânicas e de ser simples maquinaria) idêntico ao material usado nas peças com olhais e de ligação, não existe preocupação aquando da seleção do material com menor tensão de cedência para realização dos cálculos de

dimensionamento. No final do dimensionamento, é importante garantir que as características da cavilha asseguram que a tensão de comparação não excede a tensão admissível.

No que toca às forças que realizam os esforços nas cavilhas, estas são as mesmas que atuam nos parafusos previamente estudados, ou seja, irá existir uma força vertical de valor 36896,16 N (por cabo) que surge devido à tração dos cabos principais por parte dos balões no cenário mais desfavorável possível (dentro dos limites que não provoquem rutura dos cabos) e uma força que tende a ser horizontal de valor 12170,97 N (sobredimensionamento com valor superior ao real tal como no estudo dos parafusos) aquando da recolha dos balões por parte dos guinchos auxiliares.

Uma vez que o valor da primeira força referida anteriormente é superior ao valor da segunda, o dimensionamento da ligação com cavilha deve ser efetuado tendo por base o valor de 36896,16 N, ficando garantindo que caso a cavilha aguente os esforços provocados por esta força, igualmente irá aguentar a aplicação de uma força de menor valor.

Em condições de funcionamento, as secções da cavilha que ficam na transição entre a peça com olhais e peça de ligação são sujeitas tensões de corte tal como representado na Figura 6.21.



**Figura 6.21: Secções da cavilha sujeitas a tensões de corte.**

A tensão de corte,  $\tau$ , que surge nas secções da cavilha é então dada pela equação (6.5):

$$\tau = \frac{\frac{F_{cav.}}{2}}{A_{cav}} \quad (6.5)$$

Com  $F_{cav.}$  sendo a força exercida na cavilha e  $A_{cav}$  a área transversal da cavilha.

Desprezando outras tensões, partindo do critério de *Tresca* é admissível considerar que a tensão de comparação,  $\sigma_{COM}$ , é igual a duas vezes a tensão de corte,  $\tau$ . Tal como referido anteriormente, para a cavilha garantir o correto funcionamento do sistema, as

características desta têm de assegurar que a tensão de comparação é menor, ou no caso extremo igual, à tensão admissível,  $\sigma_{ADM_c}$ . Deste modo, vem:

$$\sigma_{COM} = 2\tau = 2 \times \left( \frac{\frac{F_{cav.}}{2}}{A_{cav}} \right) \leq \sigma_{ADM_c} \quad (6.6)$$

Admitindo uma tensão admissível igual a metade da tensão de cedência do material que compõem a cavilha ( $\sigma_{ADM_c} = 225 \text{ MPa}$ ), substituindo os valores na equação 6.6 e resolvendo em ordem à área transversal da cavilha vem:

$$A_{cav} \geq \frac{2 \times \frac{F_{cav.}}{2}}{\sigma_{ADM_c}} = \frac{36896,16}{225 \times 10^6} = 1,639 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 163,9 \text{ mm}^2$$

Uma vez que a secção transversal da cavilha é uma secção circular, o valor de  $A_{cav}$  é dado pela equação 6.7.

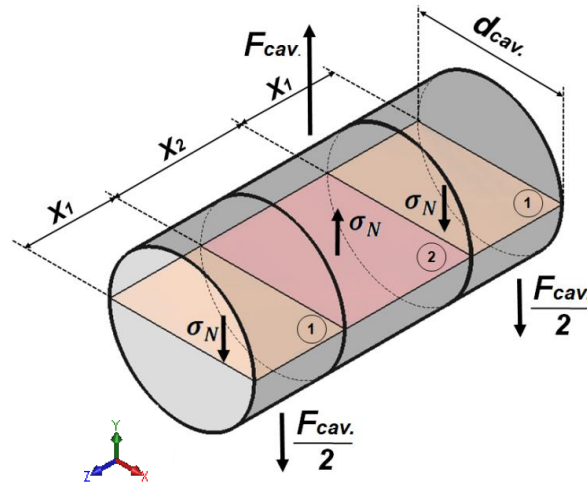
$$A_{cav} = \pi \times \frac{d_{cav.}^2}{4} \quad (6.7)$$

Com,  $d_{cav.}$  sendo o diâmetro da cavilha.

Substituindo o valor da área da secção transversal da cavilha na equação 6.7, é possível chegar ao valor do diâmetro mínimo da cavilha que suporte as tensões de corte:

$$d_{cav.} \geq \sqrt{\frac{A_{cav} \times 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{163,9 \times 4}{\pi}} = 14,45 \text{ mm}$$

Para o caso onde surgem tensões normais existentes no contacto entre as superfícies cilíndricas da cavilha e dos furos, é considerada, como aproximação, uma área projetada de secção retangular, correspondente à projeção da superfície circular num plano perpendicular à linha de ação das forças, ao invés da área transversal de secção circular utilizada nos cálculos referentes à tensão de corte. Neste cenário, as tensões surgem tanto na cavilha como nas peças ligadas a esta. Na Figura 6.22 são representadas as forças envolvidas na criação das tensões normais e as áreas projetadas das secções retangulares.



**Figura 6.22: Secções da cavilha sujeitas a tensões normais.**

A tensão normal,  $\sigma_N$ , é então dada pela equação (6.8):

$$\sigma_N = \frac{F_{cav.}}{A_{proj}} \quad (6.8)$$

Com  $F_{cav.}$  sendo a força exercida na cavilha e  $A_{proj}$  a área projetada de secção retangular.

Dependendo da secção em estudo, a área projetada de secção retangular e força aplicada varia tal como é visível na Figura 6.22. As áreas projetadas são então dadas por:

$$A_{proj_1} = d_{cav.} \times x_1$$

$$A_{proj_2} = d_{cav.} \times x_2$$

De salientar que a área projetada de secção retangular 1, equivalente à peça com olhais, necessita de ser duplamente levada em conta, sendo que, para simplificação de cálculos, uma vez que as secções são idênticas, a força exercida na secções deve ser multiplicada por dois, assim como o comprimento representado por  $x_1$ .

Assim sendo, sabendo que os comprimentos  $x_1$  e  $x_2$  são iguais a, respetivamente, 10 e 12 mm e que a tensão admissível é de 225 MPa, substituindo as expressões das áreas projetadas na equação 6.8 e resolvendo em ordem ao diâmetro da cavilha vem, respetivamente, para a secção 1 e 2:

$$d_{cav.} \geq \frac{F_{cav.}}{\sigma_{ADM} \times (2 \times x_1)} = \frac{36896,16}{(225 \times 10^6) \times (2 \times 0,010)} = 8,20 \times 10^{-3} \text{m} = 8,20 \text{ mm}$$

$$d_{cav.} \geq \frac{F_{cav.}}{\sigma_{ADM} \times x_2} = \frac{36896,16}{(225 \times 10^6) \times 0,012} = 1,367 \times 10^{-2} \text{m} = 13,67 \text{ mm}$$

Comparando os valores de diâmetro mínimo da cavilha obtidos pelas tensões normais com o valor referente às tensões de corte, verifica-se que o valor mais elevado é o de 14,45 mm alusivo ao primeiro caso estudado. Conclui-se assim que a cavilha deverá ter um diâmetro mínimo de 14,45 mm para assegurar a resistência necessária às tensões de corte e normais que surgirão do funcionamento normal da ligação. Tendo em conta esta informação, foi decidido utilizar uma cavilha com um diâmetro de 16 mm. A margem de segurança poderia ser maior caso se optasse com um diâmetro ainda mais elevado que o mínimo requerido, porém, dado o valor obtido ter sido para um caso bastante desfavorável e incomum e de não haver muito espaço disponível para realizar a ligação com cavilhas, em concreto, nos blocos dos balões secundários com rotação, conclui-se que o valor de 16 mm para diâmetro da cavilha é suficiente para o correto funcionamento da plataforma e dos sistemas de acoplamento.

#### 6.4.4 Escolha do casquilho

Apesar de não ser esperado que a peça de ligação rode com grande amplitude e livremente na peça com olhais, foi decidido colocar um casquilho para diminuir o atrito e aumentar a vida útil dos componentes. O casquilho utilizado é do fabricante *SKF* e é fabricado num composto Politetrafluoretileno (PTFE) (Figura 6.23) [35].



**Figura 6.23: Casquilho PTFE composite sem flange da empresa SKF [35].**

Com um comprimento de 12 mm e um diâmetro interior e exterior igual a 16 e 18 mm respetivamente, este casquilho sem flange é constituído por três distintas camadas: Uma camada de aço exterior, uma camada intermédia de bronze estanho e uma camada interior à base de PTFE, assegurando deste modo uma combinação entre resistência mecânica (graças ao aço) e baixa fricção (base de PTFE) [35]. É de resto nestes fatores que recai a razão da sua escolha para o sistema da empresa, uma vez que este é adequado para aplicações sem lubrificação para além de suportar cargas elevadas.

Segundo o fabricante, no que toca ao ajustamento entre o casquilho e a cavilha, as tolerâncias para a cavilha devem estar entre f7 e h8. Analisando as posições de campo f e h verifica-se que estas promovem, respetivamente, um desvio superior sempre inferior ou igual a zero, que juntamente com a posição de campo da tolerância do casquilho (rondará também H ou F) promove um ajustamento rotativo. No que toca ao furo de alojamento na peça de ligação, este deverá ter uma tolerância H7 [35].

Para verificar se o casquilho pode ser utilizado é importante garantir que a pressão superficial máxima que o casquilho suporta é superior à originada pelas forças de tração dos cabos. Tendo em conta o cenário mais desfavorável (estudado ao longo deste capítulo), a força de tração que surge nos cabos mais solicitados ronda os 36896,16 N (por cabo). Uma vez que a carga radial é determinada na superfície projetada do casquilho, vem que a pressão superficial é dada por:

$$P_{superficial} = \frac{F_{cav}}{d_c \times b_c} \quad (6.9)$$

Com  $F_{cav}$  sendo a força exercida na cavilha e transmitida para o casquilho,  $d_c$  o diâmetro do casquilho e  $b_c$  o comprimento do casquilho [35].

Substituindo os valores na equação 6.9 vem que a pressão superficial no casquilho é:

$$P_{superficial} = \frac{36896,16}{0,016 \times 0,012} = 192,17 \text{ MPa}$$

Pelo catálogo do fabricante, o casquilho escolhido suporta uma pressão superficial máxima de 200 MPa [35] (valor superior ao calculado) demonstrando assim ser um componente indicado para o sistema a projetar.

## 6.5 Simulações numéricas

Cada vez mais em diversas áreas de engenharia é incentivado e pretendido o desenvolvimento de produtos mais resistentes, no menor tempo possível e com baixo custo de produção. Com o passar dos anos, o cumprimento destes objetivos foi sendo cada vez mais facilitado muito graças ao avanço da tecnologia em especial no que diz respeito ao aparecimento de *softwares* de CAD (entre outros) e ao desenvolvimento dos computadores. Com estas poderosas ferramentas, recorrendo a modelos matemáticos e métodos numéricos, tornou-se possível a criação de modelos computacionais que traduzem sistemas reais que se pretendam estudar. Estes modelos computacionais podem então ser testados de modo a compreender o seu comportamento face aos ambientes e solicitações a que são sujeitos ou de modo a definir estratégias para a sua produção. Graças às simulações numéricas, é possível ajustar dimensões, formas ou materiais dos componentes antes que estes sejam produzidos, evitando deste modo possíveis erros, relevantes perdas de tempo e custos dispendiosos [36].

Um dos métodos numéricos mais utilizados é o método dos elementos finitos (MEF). O MEF descreve-se como um método numérico capaz de resolver problemas de engenharia que envolvam geometrias ou condições fronteira complexas. O nome do método advém do facto do MEF subdividir o domínio do problema num número finito de subdomínios menores (elementos finitos) facilitando assim a representação das funções que caracterizam estes (acabam por ser um maior número de funções, mas de complexidade mais baixa) [37]. No final, a equação diferencial que representa o problema geral é nada mais que a composição das funções polinomiais mais simples de cada um dos subdomínios, sendo esta uma das grandes vantagens do uso do MEF, já que nos permite ter um erro tão pequeno como queiramos, bastando para isso aumentar o número de elementos. Estes elementos ligam-se entre si a partir de nós, sendo o conjunto de todos estes nós e elementos denominado malha de elementos finitos.

Nesta dissertação, após projetar e desenvolver todos os componentes no *software SolidWorks*, é recorrido ao *software* de simulação de engenharia *Ansys Workbench* para realizar as simulações numéricas através do MEF. Com base nas simulações efetuadas será permitido verificar se os vários componentes dos sistemas de acoplamento dos balões à



plataforma suportam os esforços aplicados e garantem o correto funcionamento e segurança do conjunto.

Dados os cenários a que a plataforma é sujeita ao longo do seu funcionamento, considera-se relevante o estudo dos sistemas de acoplamento nos topos dos balões em dois distintos cenários:

- Tração dos cabos principais durante o funcionamento da plataforma com velocidades de vento e velocidade angular dos vários balões máximas;
- Tração dos cabos auxiliares na recolha dos balões durante o processo de aterragem.

Como já mostrado anteriormente, para os dois cenários relevantes de estudo, as forças máximas e críticas envolvidas nestes são de, respetivamente, 36896,16 N e 12170,97 N por cabo/topo do balão, podendo porém, o primeiro valor variar consoante o balão em estudo.

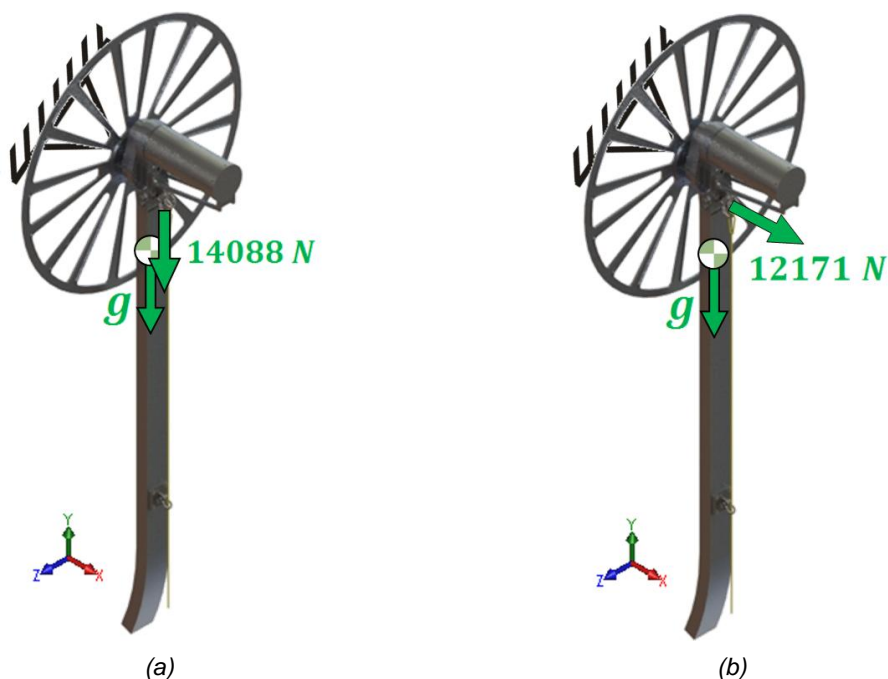
Uma vez que existem três distintos sistemas de ligação e acoplamento dos balões aos cabos (tendo em conta o tipo de balão e se têm rotação ou não), serão realizados no total sete simulações numéricas (3 simulações para o caso de um balão secundário com rotação) de modo a estudar cada um dos conjuntos face aos dois cenários mais relevantes.

Em todos os testes, os sistemas são fixos pela face da jante metálica que está em contacto com o balão sendo que os carregamentos são aplicados, de forma mais real possível, nas peças de ligação fixas aos blocos uma vez que, para simplificar as simulações, são removidas da geometria dos conjuntos certos componentes como as manilhas ou cabos principais e auxiliares. Em todos os cenários é contabilizada a aceleração da gravidade.

### **6.5.1 Balão principal**

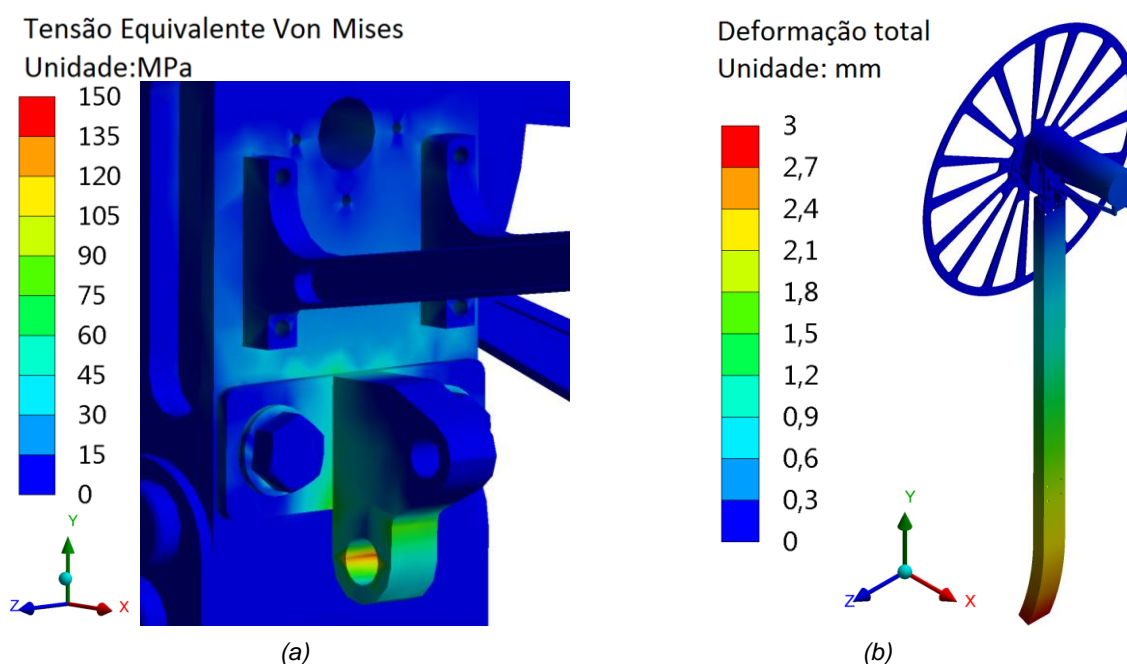
Para o cenário de estudo do balão principal, é considerada uma força vertical de sentido de cima para baixo que têm origem na tração dos cabos principais durante o caso mais desfavorável de funcionamento da plataforma. A força considerada terá então o valor de 14088,13 N. Para este cenário poderia ter sido considerado uma força igual a 13067,76 N, porém, este valor apenas traduz o valor máximo da força que garante que o sistema não cede (valor apresentado na Tabela 6.1 a dividir pelos dois cabos) quando a plataforma é composta por exatamente quatro balões. Como o número de balões secundários que constituem a plataforma pode variar (podem ser um, dois ou três), o estudo do sistema de acoplamento do balão principal tem de ser levado tendo por base o caso mais desfavorável, ou seja, quando o balão principal está imerso num escoamento de vento com velocidade 18 m/s e tem velocidade angular igual a 70 RPM (neste caso é gerada uma força de valor 14088,13 N). De relembrar, que este cenário apenas é recomendado quando na constituição da plataforma fazem parte um ou dois balões secundários, isto é, contando com o balão principal, dois ou três balões no total respetivamente.

No segundo caso, quando o balão principal é recolhido e aterrado, a tração dos cabos auxiliares origina uma força horizontal de valor 12170,97 N. Na Figura 6.24 são apresentadas as forças e o modo como são aplicadas em ambos os cenários de simulação.



**Figura 6.24: Forças aplicadas no sistema de acoplamento do balão principal; (a) Forças durante o seu funcionamento; (b) Forças durante o processo de aterragem.**

Para o primeiro caso de estudo, realizada a simulação numérica, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 6.25 no que diz respeito às tensões equivalentes (é apresentado o local com concentrações mais elevadas) e deslocamento dos componentes.

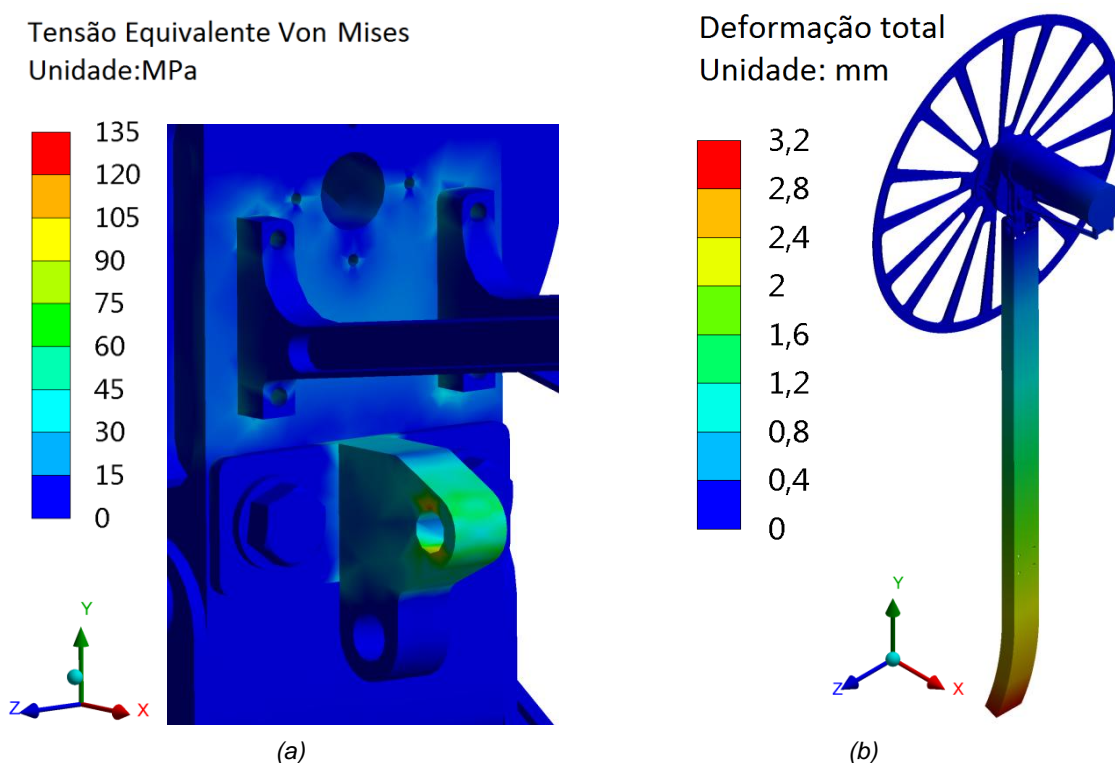


**Figura 6.25: Resultados referentes à simulação do balão principal no caso extremo de funcionamento da plataforma; (a) Tensões equivalentes de Von Mises; (b) Deslocamento dos componentes.**

Pela Figura 6.25a verifica-se que a zona mais solicitada e com tensões mais elevadas é a região em torno da fixação da peça de ligação ao bloco e em especial o olhal da peça de ligação, uma vez que é este que tem de suportar a força de tração do cabo. É de resto nesta geometria que surge o maior valor de tensão que ronda, exatamente, os 150 MPa (valor medido através da ferramenta *Probe* do *software Ansys Workbench*). Tendo em conta que a peça de ligação é constituída por aço CK45 (tensão de cedência de 450 MPa), conclui-se que fator de segurança mínimo, em relação à cedência é de 3, valor este bastante satisfatório demonstrando a resistência da peça de ligação projetada e da sua fixação ao bloco.

No que diz respeito às deformações nos componentes, analisando a Figura 6.25b, conclui-se que o bumerangue é o elemento que mais se move uma vez que a sua extremidade tem um deslocamento de cerca de 3 mm. Analisando este valor máximo de deformação, conclui-se que este não é prejudicial para o funcionamento da plataforma uma vez que é um valor substancialmente reduzido.

Para o cenário extremo do processo de aterragem, onde os esforços são aplicados horizontalmente, os resultados obtidos são os apresentados na Figura 6.26.



**Figura 6.26: Resultados referentes à simulação do balão principal no caso extremo do processo de aterragem; (a) Tensões equivalentes de Von Mises; (b) Deslocamento dos componentes.**

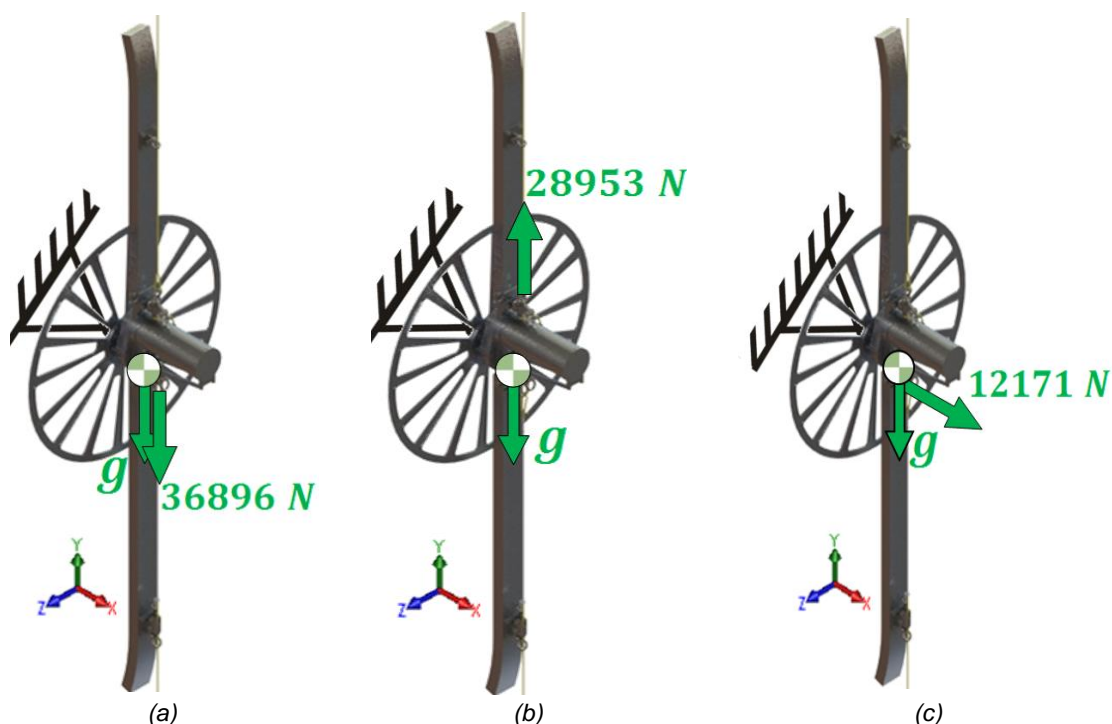
Analisando a Figura 6.26a verifica-se que à semelhança dos resultados referentes ao cenário extremo de funcionamento da plataforma, a zona mais solicitada é o olhal da peça de ligação onde é fixa a manilha que segura o cabo auxiliar que é tracionado. Porém, neste caso de simulação, o valor da tensão de *Von Mises* máxima é inferior, tendo como valor 126 MPa. Relacionando este valor com a tensão de cedência do material, verifica-se que se está perante

um fator de segurança, em relação à cedência, de 3,57, valor este superior ao primeiro caso estudado uma vez que a tensão máxima é menor.

No que toca aos deslocamentos dos componentes, estes são novamente relativamente baixos, sendo o valor máximo obtido igual a 2,8 mm para a extremidade do bumerangue. Tal como para o primeiro cenário de estudo, nenhum destes deslocamentos interfere no funcionamento da plataforma.

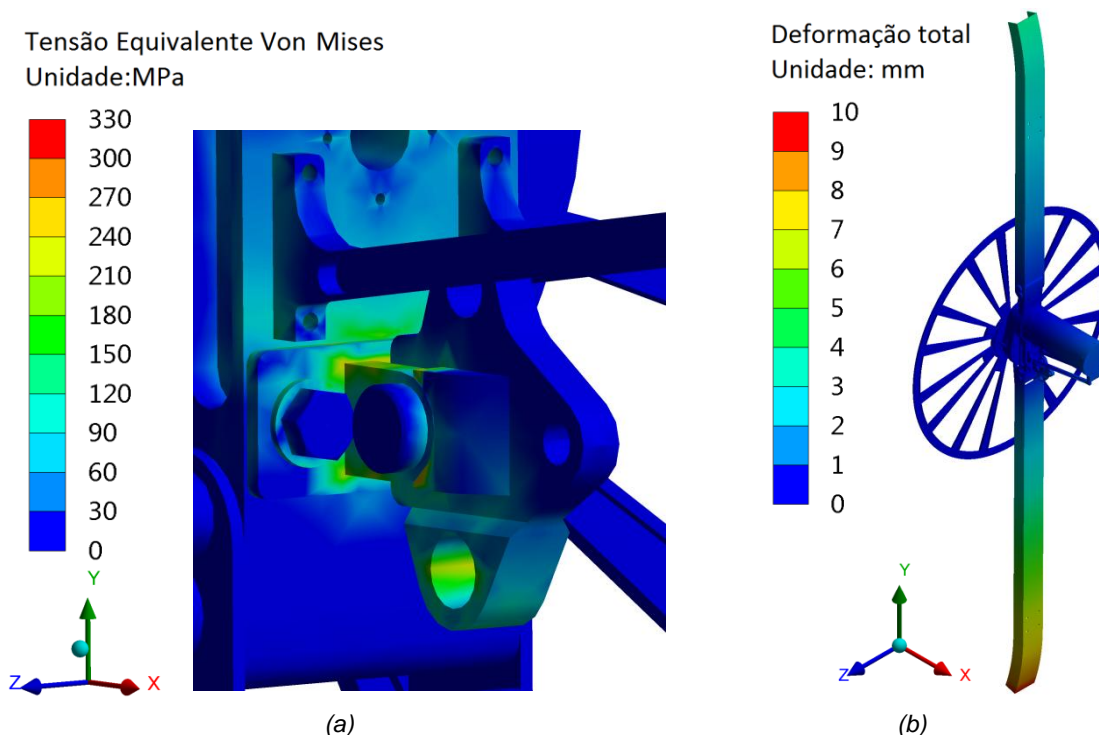
### 6.5.2 Balão secundário com rotação imposta

No cenário de estudo de um balão secundário com rotação imposta, é importante notar que a força devido à tração dos cabos principais durante o caso mais desfavorável de funcionamento da plataforma (36896,16 N) é aplicada na peça de ligação posicionada na zona mais baixa do bloco. Na peça superior é aplicada uma força igual à força exercida pelo balão principal e pelos dois outros balões secundários que fazem parte da plataforma no caso mais desfavorável. Deste modo, a força exercida na peça de ligação superior é de 28953,36 N. Já durante a aterragem do balão, a força de tração dos cabos auxiliares originada é aplicada na peça mais baixa, isto é, a posicionada imediatamente abaixo do motor. Na Figura 6.27 são apresentadas as forças e o modo como são aplicadas nos três cenários de simulação.



**Figura 6.27: Forças aplicadas no sistema de acoplamento de um balão secundário com rotação;**  
**(a) Forças durante o seu funcionamento na peça de ligação inferior; (b) Forças durante o seu**  
**funcionamento na peça de ligação superior; (c) Forças durante o processo de aterragem.**

Corrida a simulação numérica para o cenário apresentado na Figura 6.27a, no que toca às tensões equivalentes e deslocamento dos componentes, foram obtidos os valores apresentados na Figura 6.28.



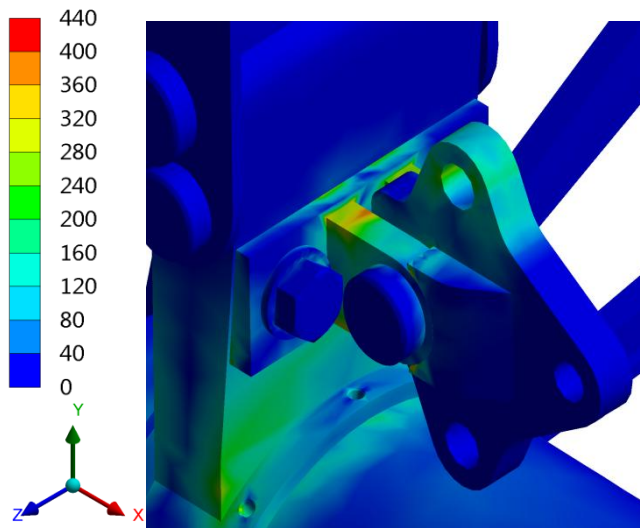
**Figura 6.28: Resultados referentes à simulação de um balão secundário com rotação no caso extremo de funcionamento da plataforma (peça de ligação inferior); (a) Tensões equivalentes de Von Mises; (b) Deslocamento dos componentes.**

Observando a Figura 6.28a, conclui-se que na peça de ligação e em especial no olhal onde é fixa a manilha G-209A 5/8, as tensões tomam valores superiores aos envolventes (de salientar o uso da peça de ligação reforçada uma vez que se está a estudar o cenário mais desfavorável possível). Todavia, a zona mais crítica, isto é, onde surgem tensões com valor mais elevado é a dos olhais da peça onde é fixa a peça de ligação. Neste local a tensão máxima ronda os 273 MPa, traduzindo-se deste modo (considerando uma tensão de cedência de 450 MPa) num fator de segurança, em relação à cedência, igual a 1,65, valor este bastante favorável tendo em conta que se está perante o cenário mais desfavorável e crítico possível.

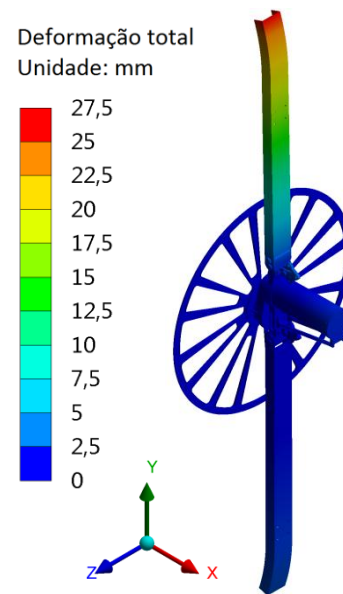
Analisando as deformações apresentadas na Figura 6.28b, verifica-se que o bumerangue inferior é o componente que mais se desloca uma vez que a sua extremidade chega a movimentar-se cerca de 9,2 mm da sua posição natural. Comparando este valor com as dimensões totais do sistema, conclui-se que este deslocamento não afeta a rotação do balão e o correto funcionamento da plataforma, não sendo assim considerado prejudicial.

Uma vez que no bloco de um balão secundário são fixas duas peças de ligação, é interessante estudar as tensões que se formam em ambas. Realizada a simulação numérica do cenário esquematizado na Figura 6.27b, foram obtidos os resultados da Figura 6.29.

Tensão Equivalente Von Mises  
Unidade:MPa



(a)



(b)

**Figura 6.29: Resultados referentes à simulação de um balão secundário com rotação no caso extremo de funcionamento da plataforma (peça de ligação superior); (a) Tensões equivalentes de Von Mises; (b) Deslocamento dos componentes.**

Analisando os valores das tensões obtidos e apresentados na Figura 6.29a, conclui-se que a zona mais solicitada é novamente a zona dos olhais da peça onde é fixada a peça de ligação. Porém, como é visível, surgem também tensões na zona de junção do bloco com a nova saliência acrescentada na zona superior deste. O aparecimento destas tensões é justificado pela inclinação da face onde é fixada a peça de ligação e da própria peça com olhais uma vez que, quando aplicada uma força vertical, é promovido o arranque e a rotação desta nova saliência. Esta característica, única dos blocos dos balões secundários com rotação imposta, promove que as tensões obtidas neste tipo de bloco sejam as mais elevadas dos três sistemas.

Todavia, a zona mais solicitada, tal como já referido, são os olhais sendo que a tensão máxima que surge neste local toma o valor de, sensivelmente, 379 MPa. Considerando uma tensão de cedência de 450 Mpa deduz-se que o fator de segurança mínimo, em relação à cedência, para o sistema é de 1,19, valor este bastante inferior a todos os outros obtidos nas simulações anteriores. Todavia, dado ao facto de se estar a estudar a situação mais crítica e que não é recomendada a executar (uma vez que se exerce nos cabos uma força muito próxima da máxima que estes suportam), é considerado que o factor de segurança obtido é admissível, porém longe de ser o ideal.

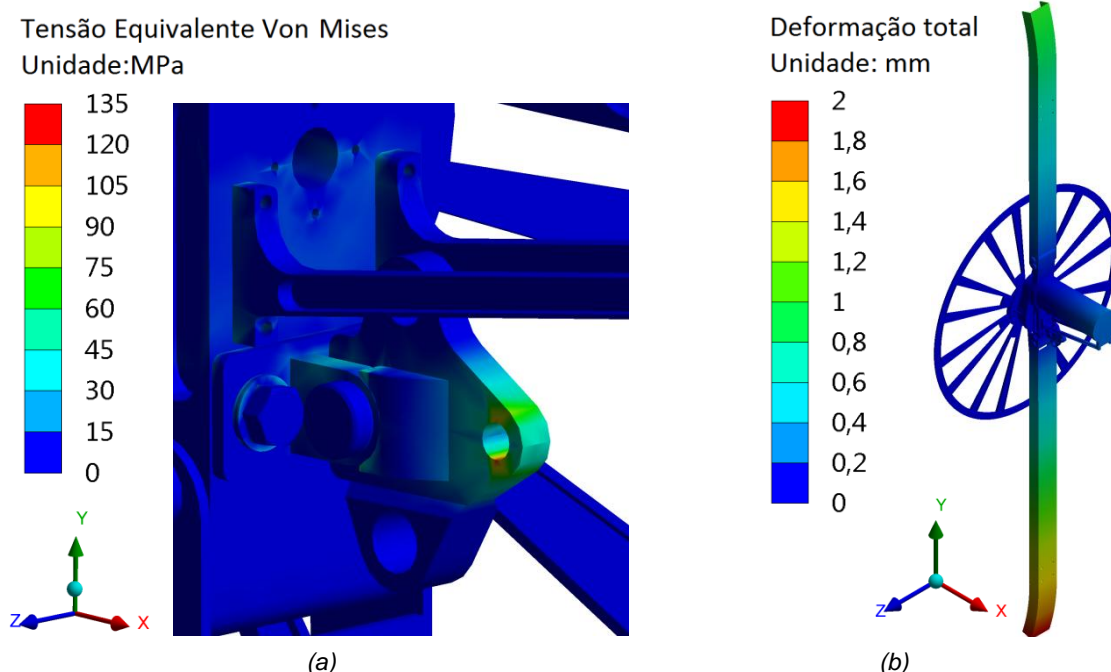
Já na zona da junção do bloco com a nova saliência acrescentada, as tensões máximas são relativamente mais baixas (275 MPa) traduzindo-se num o fator de segurança em relação à cedência de 1,75 (considerando a tensão de cedência do bloco igual a 480 MPa).

Analisando as deformações apresentadas na Figura 6.29b, verifica-se que o bumerangue superior é, naturalmente, o componente com uma maior deformação sendo que a



sua extremidade superior desloca-se, aproximadamente, 25,2 mm da sua posição inicial. Tendo em conta a distância horizontal que vai desde da jante do balão até ao bumerangue fixo no bloco (64,5 mm), conclui-se que o deslocamento de 25,2 mm da extremidade do bumerangue não promove o embate deste com o balão, não afetando deste modo a rotação e o correto funcionamento da plataforma. Dado isto, o deslocamento máximo do bumerangue não é considerado prejudicial.

Para o cenário de aterragem, a força, de valor 12170,97 N, passa a ser realizada horizontalmente e novamente na peça de ligação fixa imediatamente abaixo do motor, tal como já referido. Os resultados obtidos que dizem respeito às tensões equivalentes e deslocamento dos componentes são apresentados na Figura 6.30.



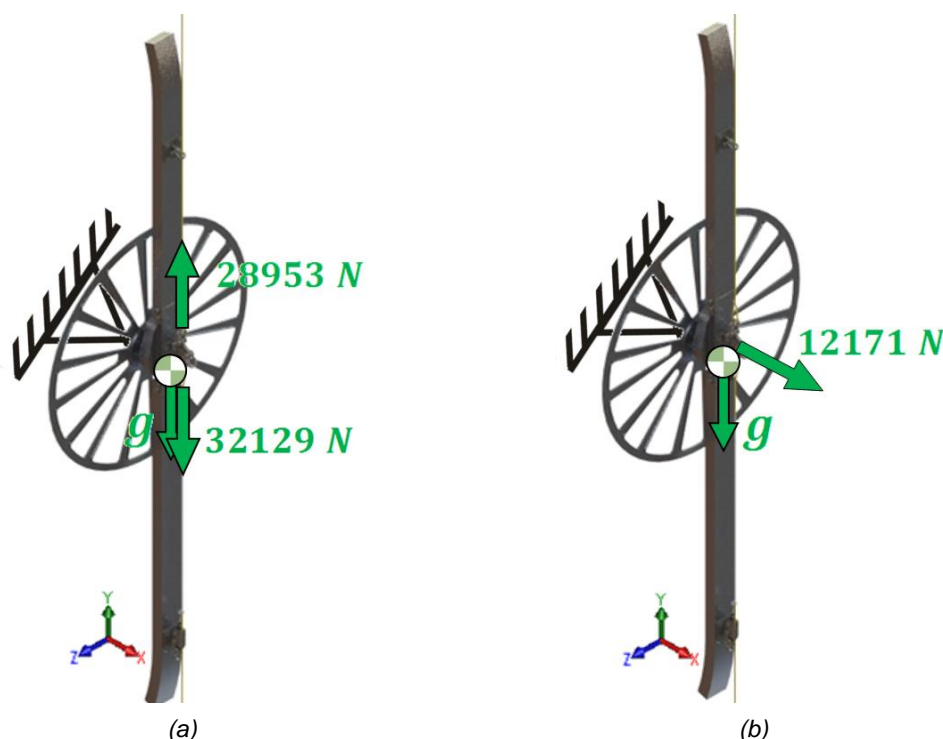
**Figura 6.30: Resultados referentes à simulação de um balão secundário com rotação no caso extremo do processo de aterragem; (a) Tensões equivalentes de Von Mises; (b) Deslocamento dos componentes.**

Com uma força paralela ao solo referente ao cenário extremo de aterragem, como visível na Figura 6.30a, a zona mais solicitada, tal como seria de esperar, é a peça de ligação (mais concretamente o seu olhal onde fixa a maninha e cabo auxiliar). Neste componente, o valor da tensão de *Von Mises* máxima lido é igual a 119 MPa, traduzindo-se num fator de segurança, em relação à cedência, de 3,78, valor este bastante favorável.

Analisando os deslocamentos dos componentes apresentados na mesma figura verifica-se que, ao contrário dos resultados obtidos para os dois cenários extremos de funcionamento da plataforma, estes tomam valores muito mais baixos, sendo o valor máximo igual a 1,8 mm. A justificação para a diferença entre os valores obtidos nos três cenários recai sobretudo no valor das forças de tração que são exercidas nas peças de ligação e do modo e direção em que estas são aplicadas.

### 6.5.3 Balão secundário sem rotação imposta

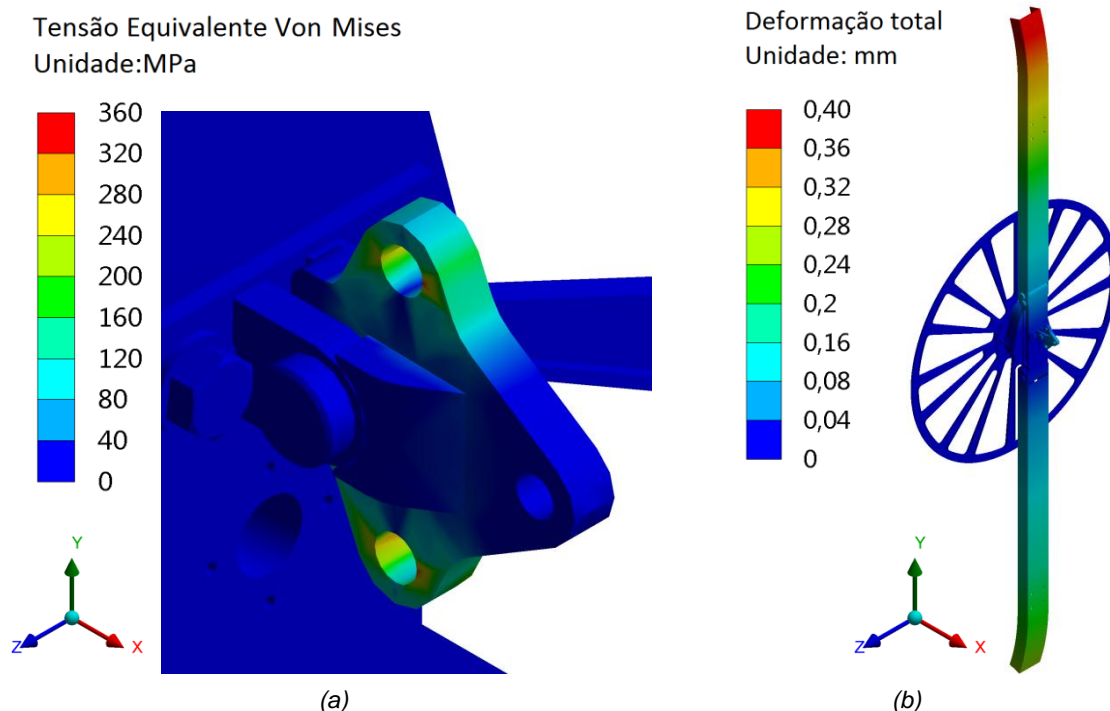
Para o cenário de um balão secundário sem rotação imposta, tanto a força originada pela tração dos cabos principais durante o funcionamento da plataforma como a força nos cabos auxiliares no processo de aterragem, são aplicadas na única peça de ligação existente e fixa na zona central do bloco do balão (à semelhança do balão principal). A existência de apenas uma peça de ligação por bloco promove ainda o aparecimento, em ambos os seus topos, de duas forças distintas, uma vez que sobre esta é aplicada a força de tração originada pelos balões superiores (balão principal e dois balões secundários com rotação que originam uma força de tração de valor igual a 28953,36 N) e a força dos cabos principais que ligam o balão ao *Bridle Point* (valor da força anterior mais a força resultante do balão em estudo (32128,57 N)). Todas as forças que atuam na peça de ligação e o modo como são aplicadas em ambos os cenários de simulação são esquematizadas na Figura 6.31.



**Figura 6.31: Forças aplicadas no sistema de acoplamento de um balão secundário sem rotação;**  
(a) Forças durante o seu funcionamento; (b) Forças durante o processo de aterragem.

Realizada a simulação numérica para o cenário mais desfavorável do funcionamento da plataforma, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 6.32.



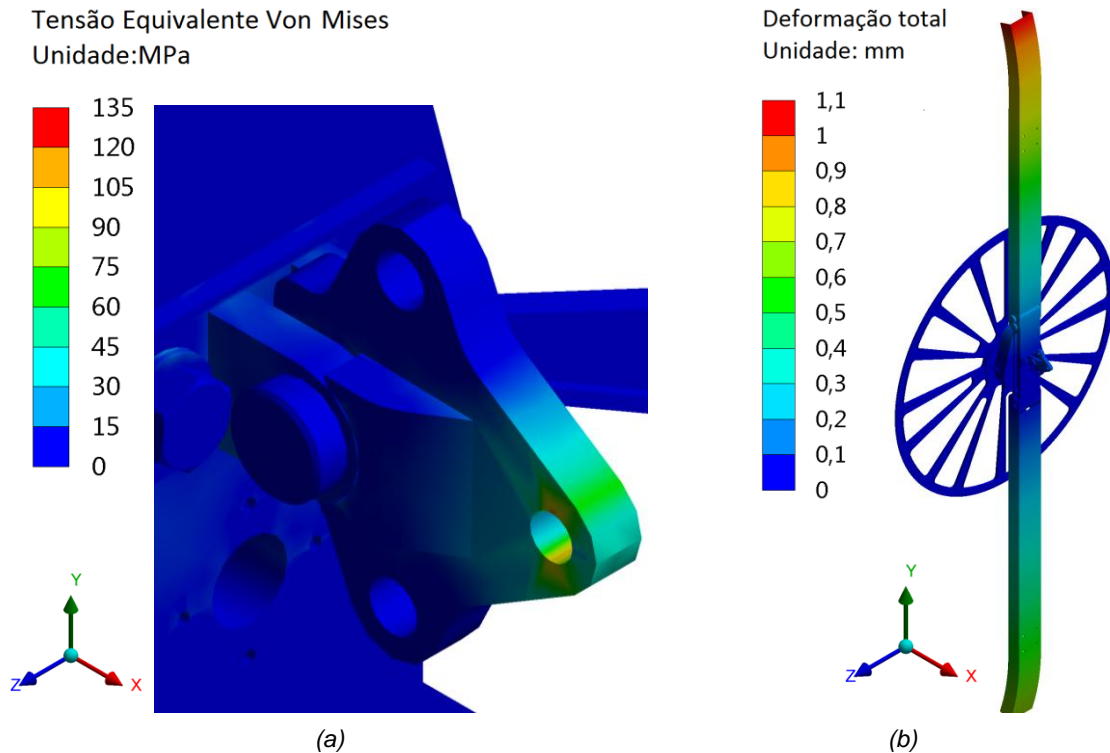


**Figura 6.32: Resultados referentes à simulação de um balão secundário sem rotação no caso extremo de funcionamento da plataforma; (a) Tensões equivalentes de Von Mises; (b) Deslocamento dos componentes.**

Analisando os valores das tensões da Figura 6.32a, verifica-se que a zona mais solicitada e com tensões mais elevadas são os olhais dos topos superior e inferior da peça de ligação uma vez que são nestas superfícies onde são aplicadas as forças de tração dos cabos. O valor de tensão mais elevado lido é então igual a, sensivelmente, 347 MPa (no topo inferior) que relacionado com o valor da tensão de cedência do material que constitui a peça de ligação resulta num fator de segurança, em relação à cedência, de 1,30, valor este aceitável tendo em conta que se estudou o cenário mais adverso possível.

No que toca às deformações nos componentes, tal como nos casos do balão principal e secundário com rotação, o elemento com um maior deslocamento é o bumerangue, neste caso superior. Porém, tal como é possível observar na Figura 6.32b, o deslocamento máximo toma o baixo valor de, aproximadamente, 0,4 mm, valor este insignificante e completamente desprezável uma vez que não coloca em causa o correto funcionamento da plataforma.

Para o caso de quando o balão é recolhido e aterrado, os resultados obtidos referentes às tensões equivalentes e deslocamento dos componentes são apresentados na Figura 6.33.



**Figura 6.33: Resultados referentes à simulação de um balão secundário sem rotação no caso extremo do processo de aterragem; (a) Tensões equivalentes de Von Mises; (b) Deslocamento dos componentes.**

Tal como nos casos da aterragem do balão principal e do balão secundário com rotação, a zona mais solicitada durante a aterragem do balão é o olhal da peça de ligação como é visível na Figura 6.33a. Neste cenário, o valor de tensão máximo ronda os 113 MPa, traduzindo-se num fator de segurança, em relação à cedência de 3,98, valor este extremamente positivo.

No que toca aos deslocamentos dos componentes (Figura 6.33b), estes são também bastante baixos tal como os valores dos cenários de aterragem dos outros dois tipos de balões. Para este caso de estudo, o maior deslocamento ocorre para a extremidade curva do bumerangue superior e tem um valor máximo, aproximadamente, igual a 1 mm. Tal como nos restantes cenários, este é um valor bastante reduzido que pode ser desprezado uma vez que não influencia negativamente nem danifica a plataforma e os componentes do sistema.

# 7

## Projeto da estrutura auxiliar

Neste capítulo é apresentado o raciocínio seguido no projeto da estrutura auxiliar dos processos de descolagem e aterragem. Na concepção da estrutura houve o cuidado de respeitar e levar em consideração os parâmetros de projeto definidos pela própria empresa e todos os dados e valores, como as forças aerodinâmicas, forças dos guinchos e componentes dos sistemas de acoplamento dos balões definidos anteriormente. O objetivo foi projetar um sistema que assegurasse, sobretudo, a segurança dos processos de descolagem e aterragem e a repetibilidade de execução das suas operações.

Tal como no capítulo anterior, é utilizado o *software* de CAD, *SolidWorks* para tornar mais simples e possível a visualização dos componentes da estrutura. O raciocínio seguido no projeto da estrutura auxiliar é esquematizado no fluxograma no anexo I. Em anexo estão também todos os desenhos técnicos dos componentes a produzir (anexo K).

Para o projeto da estrutura auxiliar dos processos de descolagem e aterragem, a equipa de projeto da empresa definiu determinados parâmetros e requisitos que o sistema teria de considerar e respeitar.

Um aspeto imprescindível na estrutura é a necessidade desta ser, obrigatoriamente, móvel tendo assim a capacidade de ser transportada e transportar os vários balões. Deste modo, a instalação de rodas de transporte será um aspeto a ter em consideração e realmente necessário. Relacionado também com a deslocação da estrutura, está o peso desta que não poderá ser exageradamente elevado ao ponto de dificultar a sua movimentação pelos operadores. A empresa definiu então que a estrutura poderia ser dividida em diferentes módulos sendo que cada um poderia ter, no máximo, 250 kg. A partição da estrutura total em diferentes e menores conjuntos permite garantir uma independência entre estes e assegurar que a estrutura é desmontável.

A estrutura auxiliar total será então composta por três subsistemas sendo dois deles idênticos. Estes dois módulos serão as torres onde os balões irão estar assentes e irão pousar

nos processos de descolagem e de aterragem, respetivamente. O módulo restante será o subsistema que garante a ligação entre as duas torres. Este conjunto é de elevada importância já que é ele que garante que a estrutura final, uma vez toda ela montada, pode ser considerada como um sistema apenas deixando de ser dividida em diferentes módulos.

Os subsistemas das torres, como já referido, serão idênticos e terão no seu topo duas bases em forma de berços onde os balões irão pousar. Nestes berços, a equipa de projeto pretende colocar diversos rolos de modo a permitir a aterragem e a descolagem do balão principal (e dos secundários se for necessário) com este ainda ou já em rotação. Deste modo é garantido um maior controlo e estabilidade dos balões, assegurando assim que os processos de descolagem e aterragem são mais seguros.

Com todos estes aspetos em consideração, é possível projetar a estrutura auxiliar de modo a ir ao encontro e a respeitar as necessidades da empresa.

## **7.1 Tipo de perfil e material da estrutura**

Parte importante no projeto de uma estrutura metálica é a escolha dos perfis e material dos vários componentes que a constituem.

Uma vez que a estrutura a projetar consiste num sistema que necessita de resistir a esforços sobretudo de compressão, promove que os perfis mais indicados a utilizar sejam os tubulares. De secção circular, quadrada ou retangular, os perfis tubulares estruturais são bastante empregados na construção civil, sendo usados recorrentemente na construção de estruturas e edifícios devido às suas várias vantagens quando comparados com outros tipos de perfil [38]. Alguns dos pontos fortes deste tipo de perfil são os seguintes [39, 40]:

- Boa resistência a altas solicitações de cargas axiais, flexão, torção e efeitos combinados;
- Baixo peso próprio, relativamente a perfis de igual resistência;
- Bastante económico tendo em conta a sua resistência;
- Superfícies exteriores pequenas, sem ângulos vivos nem rebarbas, permitindo deste modo uma fácil manutenção e boa proteção contra a corrosão;
- Aspeto visual atrativo possibilitando a produção de estruturas esteticamente atrativas.

Foi decidido então utilizar para os vários componentes dos módulos em torre da estrutura um perfil tubular quadrado que, para além das vantagens referidas anteriormente, promove ainda ligações facilitadas entre os vários componentes, devido às suas faces planas, bastando uma simples união por soldadura para garantir uma correta ligação.

No que toca ao material dos perfis, foi optado por aço carbono uma vez que é requerido uma boa resistência mecânica e rigidez estrutural. A utilização de alumínio também

foi equacionada, uma vez que é um material que também consegue garantir bons níveis de resistência e com o benefício de ser substancialmente mais leve que o aço. Porém, uma vez que as ligações entre os vários componentes que fazem parte da estrutura são realizadas por soldadura, o uso de perfis de alumínio perde interesse uma vez que soldar alumínio requer muito mais cuidados e um maior esforço quando comparado com a soldadura entre aços. Para utilizar perfis de alumínio poderia ser mais indicado utilizar ligações aparafusadas para garantir a montagem dos vários componentes. Esta decisão iria porém aumentar a complexidade da estrutura e possivelmente o seu peso total uma vez que seriam utilizados vários componentes que, usando perfis de aço, não seriam necessários.

O perfil tubular estrutural de aço que foi decidido utilizar é soldado longitudinalmente, conformado a frio e sem tratamento térmico subsequente seguindo a norma europeia EN 10219 sendo fornecido nas designações S235JRH, S275J0H e S355J2H [41].

Dos três tipos de aço apresentados, foi optado pela utilização do aço S235JRH (vulgarmente conhecido por St37) devido ao facto deste apresentar propriedades mecânicas interessantes para o projeto em causa e ser o mais comum e utilizado em construções metálicas no domínio da engenharia civil [39, 42].

Na Tabela 7.1 são apresentadas as propriedades mecânicas do aço S235JRH [41].

**Tabela 7.1: Propriedades mecânicas do aço S235JRH [41].**

Tensão de Cedência [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]		Extensão mínima [%]
	Espessura Nominal, t		
	t < 3 mm	3 ≤ t ≤ 40 mm	
235	360 – 510	340 – 470	24

Na constituição da estrutura onde os balões irão pousar serão utilizados também perfis tubulares retangulares (que formarão as bases) e cantoneiras de abas desiguais. As dimensões destes perfis irão seguir a norma EN 10219 e EN 10056 [43] respetivamente sendo que o material que os constituem é o mesmo aço S235JRH escolhido para os perfis tubulares de secção quadrada que formam a estrutura em torre.

No conjunto que garante a ligação entre as duas torres, irão ser utilizados, para além de perfis tubulares de secção quadrada idênticos aos usados na estrutura torre, perfis em C e chapas quinadas que irão garantir o encaixe do módulo nos perfis tubulares retangulares que irão compor a base das torres. Deste modo é assegurado a correta montagem e a interligação de todo o sistema e estrutura.

## 7.2 Dimensionamento do subsistema em forma de torre

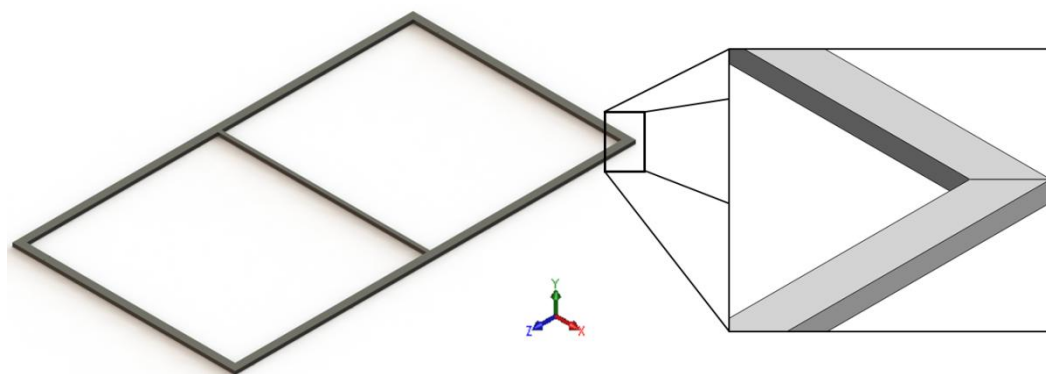
### 7.2.1 Base do subsistema

Para definir as dimensões da base do subsistema em forma de torre é necessário ter em consideração as proporções dos balões que constituem a plataforma e o posicionamento dos berços onde os balões assentam.

Com base no valor do comprimento dos dois tipos de balões (16 metros) foi definido que as cantoneiras que formam os berços onde os balões pousam estão distanciadas cerca de 400 mm. Considerando que os pontos mais baixos dos berços são posicionados a uma altura do solo igual, aproximadamente, a 2 metros, é importante posicionar os componentes que ligam estes berços à base da estrutura numa posição oblíqua, e não vertical, de modo a garantir uma maior resistência aos esforços provocados pelo embate dos balões durante a sua aterragem. A disposição destes perfis numa posição não vertical irá implicar que a base do conjunto aumente o seu comprimento para um valor bastante superior aos 400 mm caso os componentes se dispusessem na vertical. Deste modo, foi definido que a base da estrutura em torre seria retangular com dimensões 4500 mm e 2500 mm.

Os componentes que formam a base são perfis tubulares retangulares com dimensões 80x40 mm e uma espessura de 3 mm segundo a norma EN 10219. A meio da base do conjunto, é colocado um componente interior de modo permitir a ligação e fixação de outros elementos que funcionarão como travamentos. Este componente é um perfil quadrado de lado 40 mm e espessura 2 mm sendo ligado à base através de soldadura.

Na Figura 7.1 é possível observar a base da estrutura com destaque para a zona de um dos cantos a 90° onde os perfis retangulares se encontram.



**Figura 7.1: Base do conjunto em forma de torre com destaque para a zona de encontro entre os perfis retangulares.**

De salientar, tal como é visível na Figura 7.1, que a ligação entre os perfis retangulares é feita recorrendo a cortes a 45° em ambos os componentes, ligando-os de seguida através de soldadura. Este tipo de ligação, comum nos 4 cantos da base, garante que não ficam expostas arestas e superfícies interiores dos perfis evitando assim possíveis problemas associados a corrosão.

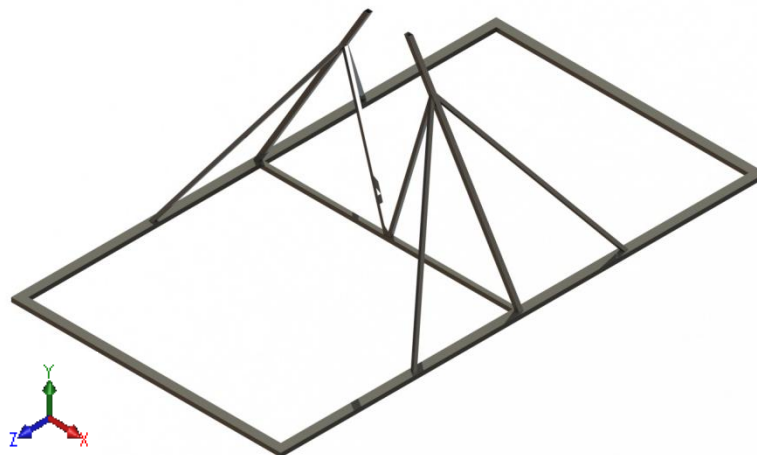
### 7.2.2 Estrutura do subsistema

Para garantir o correto posicionamento das cantoneiras e dos berços que recebem os balões, são usados componentes que garantem a ligação destes à base do subsistema.

De modo a garantir segurança aos processos onde a estrutura é usada, foi determinado que os pontos por onde os balões são recolhidos, isto é, as peças de ligação fixas ao bloco, não podem baixar e ficar a uma distância do solo inferior a 3 metros. Com base nesta decisão, e conhecendo os valores dos diâmetros dos balões, é possível definir a altura da estrutura. Como o balão mais pequeno tem um raio igual a 1,25 metros, é imperativo que a estrutura, desde do ponto mais baixo onde os balões assentam até ao solo, tenha uma altura mínima de 1,75 metros.

Dado que à base da estrutura são fixas as rodas de transporte, foi decidido que a distância desde do ponto mais baixo da base em berço (onde o elemento é soldado) até à base da estrutura seria de, sensivelmente, 1,77 metros (em  $Y$ ). Esta dimensão não é porém o comprimento do elemento uma vez que o perfil será posicionado obliquamente. Esta disposição dos elementos que forma o esqueleto do subsistema é bastante importante visto que o principal esforço a que a estrutura estará sujeita é a forças de compressão verticais devido à aterragem dos balões. De modo a melhorar a rigidez da estrutura e a evitar a flexão dos elementos, estes são então dispostos não numa posição completamente vertical mas sim obliquamente ligando a base às cantoneiras.

Na Figura 7.2 é possível observar os elementos centrais que ligam a base da estrutura ao ponto mais baixo dos berços (não representados) onde os balões pousam.

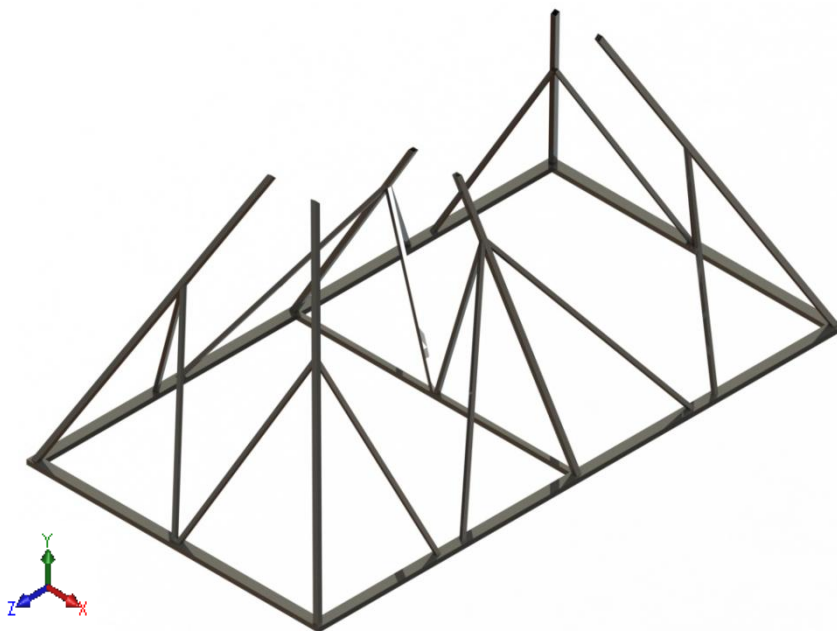


**Figura 7.2: Perfis centrais responsáveis pela ligação da base ao ponto mais baixo da base em forma de berço.**

Com a aterragem dos balões na estrutura, uma vez que os componentes são dispostos obliquamente, a força de embate vertical é decomposta numa componente paralela e perpendicular aos perfis sendo que esta última origina esforços de flexão. De modo a evitar a flexão dos componentes maiores são adicionados seis outros elementos menores que fazem a

ligação entre os perfis centrais e o componente interior da base e a própria base. Estes elementos também são visíveis na Figura 7.2.

Em cada canto da base é posicionado um componente que garante a ligação desta aos berços. Tal como nos componentes centrais, estes elementos são dispostos obliquamente pelas mesmas razões referidas anteriormente. Devido ao facto dos berços terem uma geometria semicircular, uma vez que o ponto mais baixo coincide com a zona central da estrutura, os elementos posicionados nos cantos da base têm obrigatoriamente um maior comprimento que os componentes da zona central. O comprimento destes perfis é de então sensivelmente 2,58 metros, estando o seu ponto mais alto (onde liga às cantoneiras que formam os berços) a uma altura de 2,13 metros da base do subsistema. Devido à sua esbelteza são adicionados, à semelhança do que é feito nos componentes centrais, dois reforços de modo a reduzir o vão e garantir uma maior resistência à flexão por parte destes perfis. Na Figura 7.3 é apresentada toda a estrutura do subsistema.



**Figura 7.3: Estrutura do subsistema em forma de torre.**

Os componentes utilizados são todos eles perfis tubulares quadrados sendo que os elementos principais têm 40 mm de lado e 2 mm de espessura. Já os componentes que funcionam como travamentos, têm uma secção menor com apenas 30 mm de lado e 2 mm de espessura sendo todos eles ligados através de soldadura. Os cordões têm um cateto de 4 mm e são feitos, sempre que possível, em toda a periferia na junção entre os componentes. É garantido assim uma boa estanquidade na zona onde há interceção de perfis, redução do peso da estrutura e aumento da sua rigidez estrutural e da facilidade na montagem dos vários componentes.

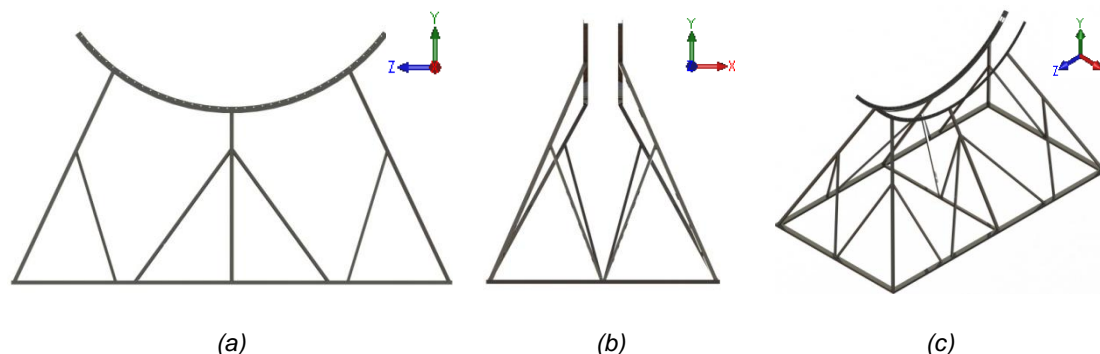


### 7.2.3 Base em forma de berço e rolos

Para assegurar a aterragem e a descolagem dos balões de forma segura e controlada é projetada uma base em forma de berço que permite, de certa forma, a limitação do movimento dos balões uma vez que estes assentem na estrutura. Na composição das bases são utilizados ao invés de uma simples chapa, vários rolos que simulam uma superfície de assento e, ao mesmo tempo, oferecem aos balões a possibilidade de terem rotação mesmos pousados na estrutura após ou antes de aterrar e de descolar respetivamente.

A estrutura da base é formada por duas cantoneiras de abas desiguais de aço com dimensões L65x50x5 segundo a norma EN 10056. Para apresentarem a geometria circular requerida (e formarem a base em forma de berço) as cantoneiras são calandradas. Este é de resto um dos motivos do uso de cantoneiras uma vez que existe vários equipamentos de calandragem deste tipo de perfil, tornando a geometria pretendida em algo facilmente exequível. O facto de as cantoneiras permitirem uma fácil ligação aos elementos que dão corpo à estrutura de todo o sistema ao mesmo tempo que garantem uma superfície para a fixação dos rolos foi também um aspeto tido em consideração na sua escolha.

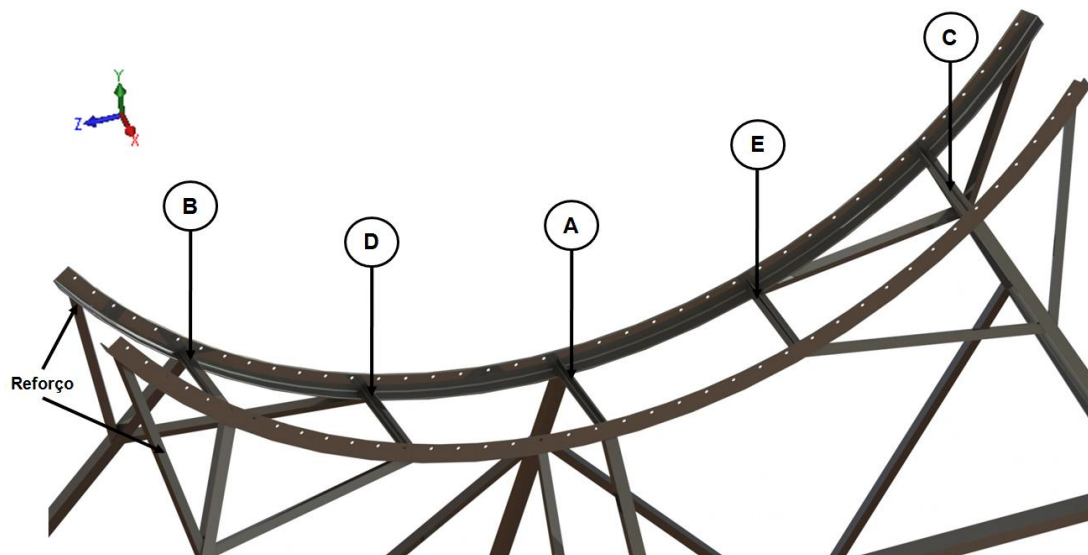
As cantoneiras são fixas aos elementos de forma paralela ficando com as abas menores dispostas para o interior da base. A distância entre as superfícies interiores das abas maiores é igual a 412 mm. O modo como as cantoneiras se enquadram na estrutura de todo o sistema é visível na Figura 7.4.



**Figura 7.4: Posicionamento das cantoneiras na estrutura auxiliar; (a) Vista lateral; (b) Vista de frente; (c) Vista em perspetiva.**

Para garantir uma maior rigidez à base em forma de berço e para evitar que as cantoneiras sofram esforços de flexão e torção (garantindo que estes componentes continuam paralelos e à distância pretendida), são adicionados cinco componentes que ligam as duas cantoneiras. Estes elementos são perfis em T com dimensão 40x35 segundo a norma EN 10055. O comprimento de todos estes componentes é idêntico e igual à distância entre as cantoneiras, ou seja, 412 mm. Os perfis em T são então estrategicamente colocados de modo a ligar as cantoneiras nas zonas onde os componentes vindos da base as encontram. A fixação dos perfis em T é feita por soldadura com estes assentes pelos seus banzos nas abas menores das cantoneiras. Para além dos elementos fixos às zonas central e lateral, são ainda

adicionados dois outros perfis a meio das distâncias entre o perfil central e o perfil de cada uma das laterais. Deste modo é garantida uma rigidez estrutural à base que é bastante importante durante a aterragem dos balões, evitando que esta se deforme. Estes dois últimos perfis referidos são identificados na Figura 7.5 pelas letras D e E.



**Figura 7.5: Perfis em T ligados às cantoneiras e utilizados para reforçar a base em berço da estrutura.**

Na Figura 7.5 são visíveis também oito reforços que ligam os perfis dos cantos às cantoneiras da base em forma de berço. Estes elementos são de geometria idêntica aos restantes travamentos utilizados (perfil tubular com dimensões 30x30x2mm) sendo ligados à estrutura por soldadura. A adição destes elementos prende-se, sobretudo, por razões de segurança uma vez que estes tornam toda a estrutura mais resistente e rígida, tendo um papel muito importante em casos onde a aterragem dos balões não é a ideal (embate dos balões nas extremidades da base em berço).

Nas abas maiores das cantoneiras são abertos furos de modo a permitir a montagem dos rolos que formam a superfície de contacto com os balões. Estes furos são semelhantes em ambas as cantoneiras e têm como diâmetro a medida do eixo dos rolos escolhidos. O número de furos por cantoneira é igual ao número de rolos que é decidido utilizar.

Com base na força que os guinchos auxiliares realizam ao recolher os balões e a consequente força de embate que estes originam na base em berço da estrutura auxiliar (raciocínio seguido no cálculo do valor das forças e suas componentes é apresentado no subcapítulo 7.5.1), foram escolhidos os rolos mais adequando de vários existentes no mercado.

Os rolos escolhidos foram os da série 1700 – *Universal conveyor roller* do fabricante *Interroll*. Dentro da série pretendida, referente ao *design* do eixo, foi decidido optar pelo *Spring-loaded shaft*, isto é, eixo constituído por uma mola. O tipo de rolo escolhido está representado na Figura 7.6.



**Figura 7.6: Rolo da série 1700 com spring-loaded shaft do fabricante Interroll [44].**

A opção por um rolo estilo *Spring-loaded shaft* pretende-se sobretudo pelo facto destes poderem ser utilizados em várias tarefas distintas e serem de fácil montagem.

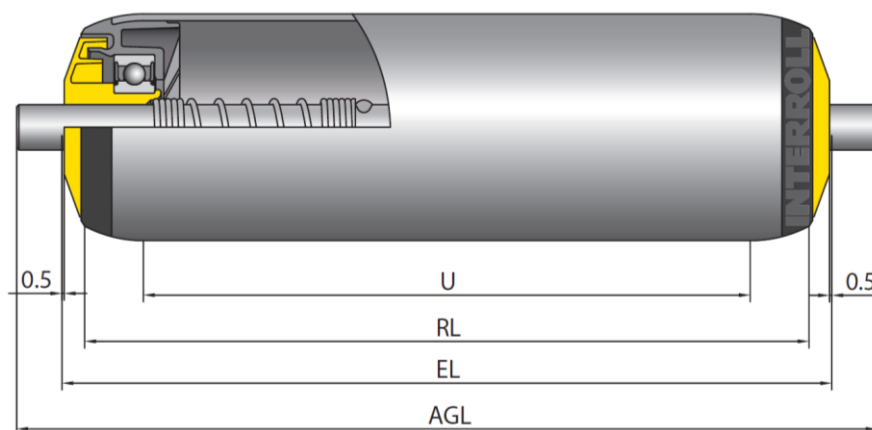
Tendo uma boa proteção contra a poeira, água e corrosão, foi decidido utilizar rolos de alumínio com um diâmetro, espessura e comprimento iguais a 50, 1,5 e 400 mm, respetivamente. Em relação ao eixo, este é de aço inoxidável e circular com um diâmetro igual a 12 mm. Pelo catálogo do fabricante, considerando o material, diâmetro e comprimento do tubo e diâmetro do eixo, conclui-se que cada rolo têm capacidade de suportar uma carga de 2000 N, isto é, 204 kgf sensivelmente, tornando estes rolos uma solução bastante interessante devido à elevada resistência e baixo peso uma vez que têm apenas, por exemplo, cerca de 34% do peso de um rolo de aço com características idênticas [44].

As dimensões dos rolos são obtidas com base no tipo de eixo pretendido. Recorrendo às informações presentes no catálogo da *Interroll*, temos que as dimensões para o tipo de rolo escolhido são as sumariadas na Tabela 7.2.

**Tabela 7.2: Dimensões do rolo escolhido.**

Diâmetro x Espessura [mm]	Diâmetro Eixo [mm]	RL [mm]	EL [mm]	AGL [mm]	U [mm]
50 x 1,5	12	400	410	434	374

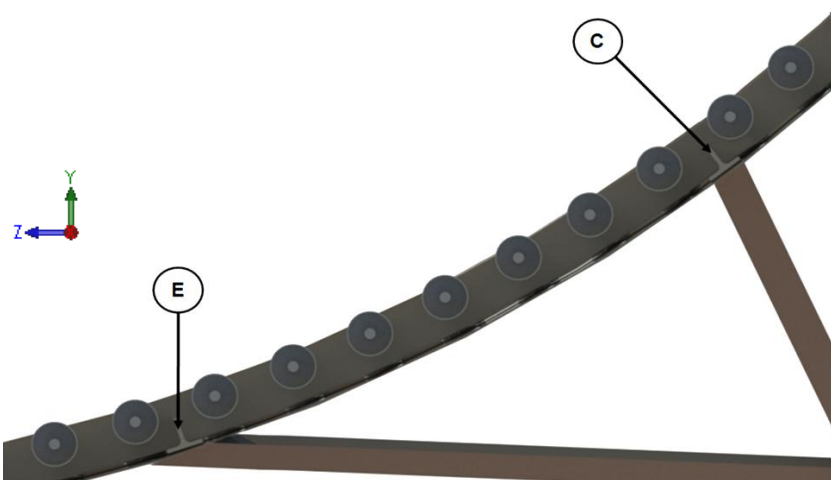
Sendo os termos representados por *RL*, *EL*, *AGL* e *U* os comprimentos indicados na Figura 7.7.



**Figura 7.7: Dimensões do rolo escolhido [44].**

Pelo esquema da Figura 7.7, é possível notar que a distância representada por *EL* tem uma dimensão igual a 410 mm, assumindo já uma folga do fabricante de 0,5 mm de cada lado para garantir montagem. Porém, no projeto da estrutura auxiliar e mais concretamente na base em forma de berço, foi definido uma distância entre as superfícies interiores das abas maiores das cantoneiras igual a 412 mm, criando assim uma folga entre os rolos e as cantoneiras de 1,5 mm de cada um dos lados. Este aumento da folga comparado com o valor indicado pelo fabricante não é prejudicial sendo até importante uma vez que é garantido assim que a montagem dos rolos é facilitada e sempre possível de realizar mesmo quando, por algum motivo, a folga diminua, como por exemplo, se a estrutura for pintada.

No que toca ao número de rolos que constituem a base, foi decido utilizar 40 rolos. Os rolos são igualmente distribuídos entre as duas laterais partindo do centro e ponto mais baixo da base sendo a distância entre os eixos de rotação de cada rolo sempre igual a 90 mm. Na definição das posições dos vários rolos foi tido em consideração os perfis em T previamente adicionados à estrutura, garantido assim que os rolos podem rodar livremente e sem risco de colidirem com os elementos em T. Na vista em corte da Figura 7.8 é possível verificar as posições dos rolos e dos perfis em T identificados por E e C.



**Figura 7.8: Vista em corte da base em forma de berço da estrutura em torre com destaque para as posições dos rolos face aos perfis em T identificados pelas letras E e C.**

O facto de ser utilizado um número bastante elevado de rolos é justificado pela necessidade de simular uma superfície o mais continua e cilíndrica possível. Uma vez que os balões são insuflados com hélio, estes não são componentes completamente rígidos deformando-se sempre que embatem em qualquer obstáculo. Assim sendo, à medida que são adicionados mais rolos, a deformação dos balões é cada vez menor visto que estes passam a ficar assentes numa maior área de contacto o que facilita e promove, também, a sua correta rotação. Com o aumento de número de rolos, a pressão de embate dos balões, provocada pelo impacto da sua aterragem, é também distribuída por uma maior área promovendo que cada rolo tenha de suportar um muito menor esforço. Na Figura 7.9 é apresentada a base em forma de berço da estrutura em torre com os 40 rolos já instalados.



**Figura 7.9: Base em forma de berço da estrutura em torre.**

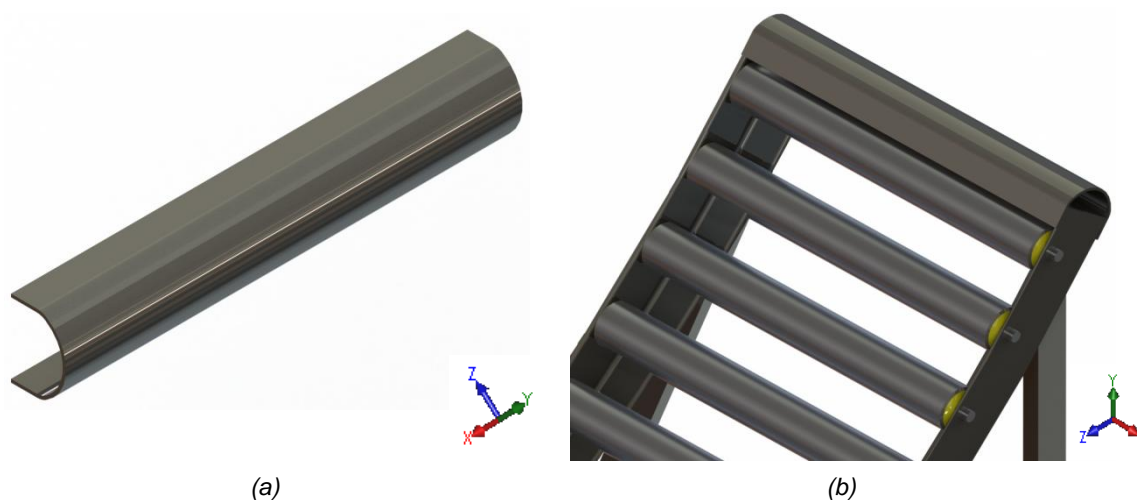
Em contrapartida, o ponto fraco mais relevante da utilização de um número elevado de rolos é, para além do aumento do peso da estrutura, o aumento da inércia que os balões têm de vencer para poder rodar livremente ao aterrarem na base em berço. Apesar do elevado número de rolos garantir uma melhor rotação dos balões, ao mesmo tempo obriga que esses mesmos balões façam rodar um maior número de rolos, sendo que, em casos onde a inércia dos rolos é muito elevada, origina problemas de abrasão desgastando tanto a camada exterior em rede de cabo *Dyneema* dos balões como os próprios rolos devido ao atrito e fricção.

Com grande influência nos problemas de abrasão estão as rugosidades superficiais das superfícies de contato, neste caso, dos rolos [45]. O desgaste do cabo sintético de *Dyneema* é então cada vez maior à medida que a rugosidade superficial dos rolos aumenta. Segundo o fabricante, os rolos apresentam um momento de inércia baixo que a juntar ao também baixo coeficiente de atrito entre os rolos e a rede de cabo *Dyneema* (deverá variar entre 0,1 e 0,15 [46]) e ao facto da empresa *Lankhorst* garantir que este mesmo cabo que forma a camada exterior dos balões apresenta uma excelente resistência ao desgaste por

abrasão, é possível considerar que o desgaste devido à fricção entre os componentes será bastante reduzido ou até mesmo inexistente, não existindo então graves consequências na utilização de um grande número de rolos na plataforma.

Outros problemas como, por exemplo, irregularidades na geometria dos balões (balões não têm uma geometria perfeitamente cilíndrica mas sim em forma de elipse ou oval), ou uma variação de espessura na camada exterior formada pela rede de cabo *Dyneema* devido à sobreposição de rede em determinadas zonas do balão, podem dificultar a aterragem e sobretudo a rotação dos balões uma vez assentes na estrutura. Caso fossem utilizados poucos rolos na base, os vários balões ficariam sempre assentes num baixo número de pontos, que adicionado aos problemas referidos anteriormente, dificultariam ainda mais a sua rotação. A utilização de vários rolos é então uma vez mais indicada como sendo uma boa solução já que permite simular uma superfície de assento muito maior e mais contínua assemelhando-se a uma base formada por uma chapa calandrada.

Caso o processo de aterragem não seja devidamente executado ou a estrutura auxiliar não esteja corretamente posicionada no local de aterragem, os balões poderão embater nas esquinas das cantoneiras, que formam a base em forma de berço e romperem-se. De modo a evitar que os balões se danifiquem, são soldadas às extremidades das cantoneiras chapas de aço quinadas em forma de U (Figura 7.10) eliminando deste modo as arestas vivas e assegurando que caso os balões embatem nestas superfícies, não se rompem nem danificam.



**Figura 7.10: Chapas de proteção; (a) Chapa de proteção já quinada e em forma de U; (b) Correto posicionamento das chapas no conjunto da estrutura auxiliar.**

#### 7.2.4 Rodas de transporte

Uma característica muito importante e indispensável no subsistema em forma de torre é a necessidade desta ser móvel. Para isso é necessário instalar na base da estrutura rodas de transporte.

Assumindo o peso máximo de 250 kgf (definido pela empresa) para a estrutura e tendo em consideração as forças de embate na aterragem dos balões, é possível escolher umas



rodas de transporte existentes no mercado que aguentem os esforços exigidos. Recorrendo ao catálogo da empresa *Elesa* foram escolhidas as rodas do modelo Re.E3-150-SBF com um diâmetro de 150 mm (Figura 7.11). Por base em forma de torre são utilizadas 6 rodas (uma por cada canto e as restantes duas nos nós centrais).



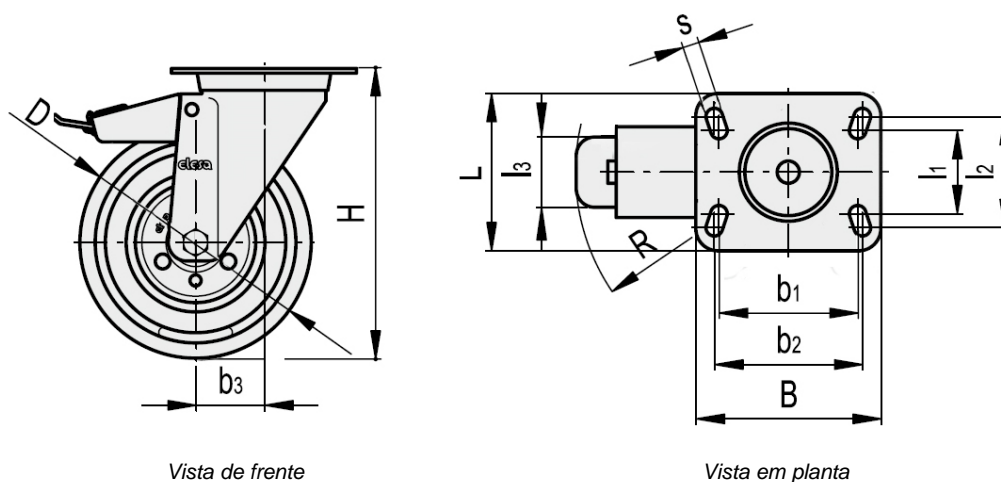
**Figura 7.11: Roda de transporte utilizada; (a) Roda de transporte Re.E3-150-SBF da empresa Elesa; (b) Respetivo modelo CAD.**

O modelo Re.E3-150-SBF é caracterizado por oferecer uma roda de borracha vulcanizada com suporte giratório e travão de pedal que bloqueia tanto o deslocamento da roda como a rotação do suporte. Esta é de resto uma característica bastante importante uma vez que é fundamental a imobilização da estrutura na correta posição para a realização dos processos de descolagem e aterragem. Tanto o suporte como o travão são produzidos em aço zincado [47].

Segundo o fabricante este modelo é recomendado para o transporte e guiamento manual podendo ser utilizado em ambientes quer interiores quer exteriores e em vários tipos de piso (asfalto, betão, etc), sendo também adequado para o uso em ambientes húmidos e na presença de agentes atmosféricos [47].

Em termos de resistência, tendo em conta o diâmetro da roda igual a 150 mm, esta é capaz de aguentar esforços estacionários na ordem dos 3000 N (306 kgf sensivelmente) [47]. Uma vez que os balões aterram na estrutura estando esta imobilizada, é garantido que a força realizada nas 6 rodas de cada base, devido ao embate dos balões e peso da estrutura, é bastante inferior à máxima suportada pelas rodas de transporte, garantido assim que o sistema não cede.

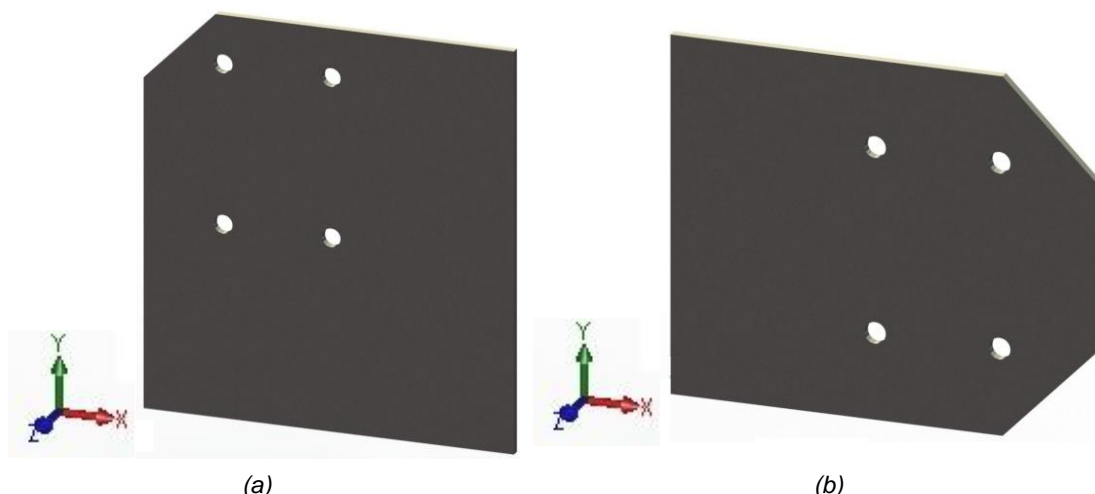
As dimensões da roda de transporte são apresentadas na Figura 7.12.



Elesa Standards		Dimensões principais											
Código	Descrição	D	l3	H	B	L	s	b1	l1	b2	l2	b3	R
450116	RE.E3-150-SBF-N	150	40	182	100	85	9	75	45	80	60	37	120

**Figura 7.12: Dimensões da roda de transporte Re.E3-150-SBF da empresa Elesa (adaptado de [47]).**

A fixação das rodas de transporte é feita através de quatro parafusos M8 numa chapa de aço, esta que por sua vez está soldada à base da estrutura em forma de torre. Dependendo da localização das rodas de transporte, as chapas têm configurações diferentes. Caso seja uma chapa a instalar num canto ou num dos nós centrais, a geometria adotada é a apresentada na Figura 7.13a e Figura 7.13b respetivamente. Independentemente da geometria, todas as chapas têm uma espessura de 4 mm.

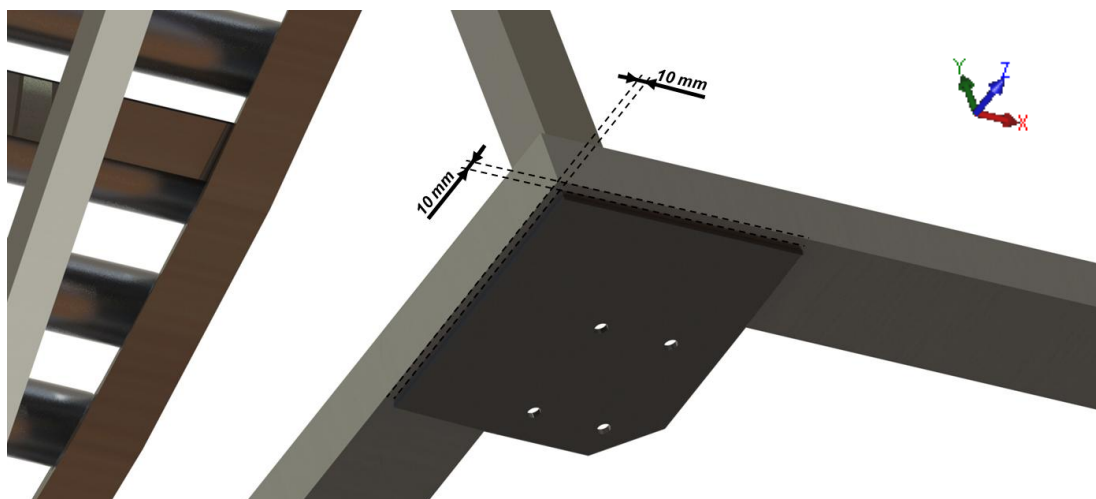


**Figura 7.13: Chapas usadas para a fixação das rodas de transporte à estrutura auxiliar; (a) Chapa usada nos cantos; (b) Chapa usada nos nós centrais.**

Como já referido, todas as chapas são soldadas aos perfis retangulares que constituem a base da estrutura sendo os cordões (com um cateto de 4 mm) feitos em toda a periferia na junção entre os dois componentes. O correto posicionamento e posterior soldadura das chapas



na base é bastante importante uma vez que as superfícies de maior comprimento dos perfis retangulares têm uma grande tendência para fletirem quando aplicados esforços na sua zona central. Deste modo, para evitar o aparecimento de momentos de flexão que danifiquem os perfis da base, as chapas de fixação das rodas de transporte são soldadas junto às extremidades destes mesmos perfis sendo que as faces paralelas aos eixos dos furos devem ficar sempre paralelas e a uma distância de 10 mm das faces exteriores dos perfis retangulares que formam a base. Na Figura 7.14 é apresentado a correta posição das chapas onde se ligam as rodas.



**Figura 7.14:** Correta posição na base da estrutura das chapas de fixação das rodas de transporte.

Uma vez montado todo o subsistema em forma de torre e com os vários rolos e rodas de transporte acopladas (assim como a chapa de ligação apresentada no subcapítulo 7.3.2), chega-se ao peso total de, sensivelmente, 239 kgf, verificando assim que está abaixo do peso limite imposto pela empresa, cumprindo deste modo o requisito de projeto.

### 7.2.5 Cintas de amarração

Durante o processo de aterragem, após os balões (de forma individual) aterrarem e pousam na estrutura em torre, é importante garantir que estes são impedidos de se movimentar permitindo assim o seu desacoplamento da plataforma e posterior transporte de forma mais segura (o constrangimento dos balões é igualmente importante antes do processo de descolagem). Para garantir a fixação dos balões à estrutura, é recorrido, tal como atualmente para uma plataforma constituída por apenas um balão, a cintas de amarração.

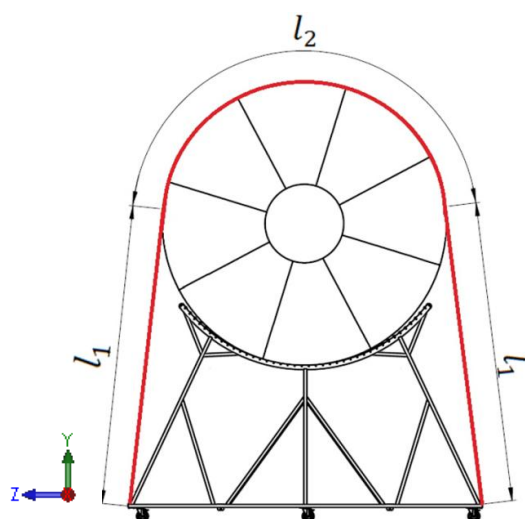
As cintas de amarração irão fazer parte de todo o sistema da estrutura tendo uma das pontas fixas à base. Com o pousar nas bases em forma de berços dos balões que constituem a plataforma, as cintas são feitas passar em torno destes de forma manual por parte de operadores, sendo posteriormente ligadas ao roquete da extremidade oposta e fixas à base. No total, é usado uma cinta por cada estrutura em forma de torre, ou seja, os balões são

constrangidos por duas cintas colocadas sempre junto às suas extremidades. Na Figura 7.15 é mostrada a disposição de uma das cintas uma vez colocada em torno do balão principal.



**Figura 7.15:** Disposição de uma das cintas de amarração (a amarelo) utilizada no constrangimento do balão principal.

Devido ao facto das cintas necessitarem de contornar os balões, sendo que estes têm o seu eixo a uma altura do solo superior a 3 metros, há necessidade de utilizar umas cintas de amarração com comprimento superior às atuais da empresa. Considerando o caso da aterragem do balão principal (balão que tem o maior diâmetro), é possível calcular o comprimento mínimo da cinta a utilizar. Na Figura 7.16 são representados os comprimentos necessários de conhecer para obter o comprimento de cinta mínimo necessário para amarrar os balões.



**Figura 7.16:** Vista lateral da estrutura auxiliar já com o balão principal aterrado e cintas devidamente colocadas.

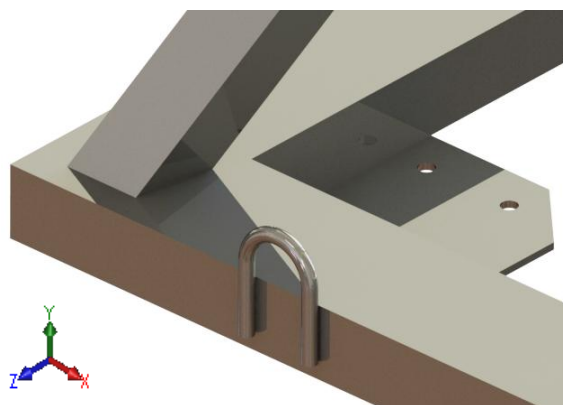
Através do *software SolidWorks* é possível encontrar os comprimentos representados na figura anterior, obtendo-se então para  $l_1$  e  $l_2$  os valores respectivos de 3,8 e 5,3 metros. Assim sendo, conclui-se que é necessário, uma cinta com um comprimento mínimo igual a 12,9 metros. Com este valor em consideração, foram escolhidas umas cintas de amarração de 50 mm de largura e 15 metros de comprimentos da empresa *Budin Ferramentas* (Figura 7.17).



**Figura 7.17: Cinta de amarração da empresa Budin Ferramentas [48].**

Este tipo de cintas possui nas extremidades ganchos que garantem a sua fixação à base da estrutura, para além do roquete que auxilia no puxar da cinta e a traciona assegurando um aperto firme dos balões. Composta por poliéster bastante resistente e flexível, as cintas têm a capacidade de aguentar esforços na ordem das 3 toneladas [48], o que, no caso do projeto em causa, não é uma característica relevante e necessária uma vez que o papel das cintas de amarração passa apenas pelo constrangimento dos balões. Independentemente disso, é confortável saber que as cintas têm uma elevada resistência.

Para ligar as cintas à base da estrutura auxiliar são soldados, nos perfis retangulares da base, dois varões redondos lisos previamente dobrado e em forma de U, permitindo assim o acoplamento dos ganchos. Dada a sua secção curva, os ganchos são livres de rodar de modo a ajustarem-se no sentido das forças que surgem. Um dos varões utilizados é apresentado na Figura 7.18.



**Figura 7.18: Varão soldado à base da estrutura onde são fixas as cintas de amarração.**

## 7.3 Dimensionamento do subsistema de ligação

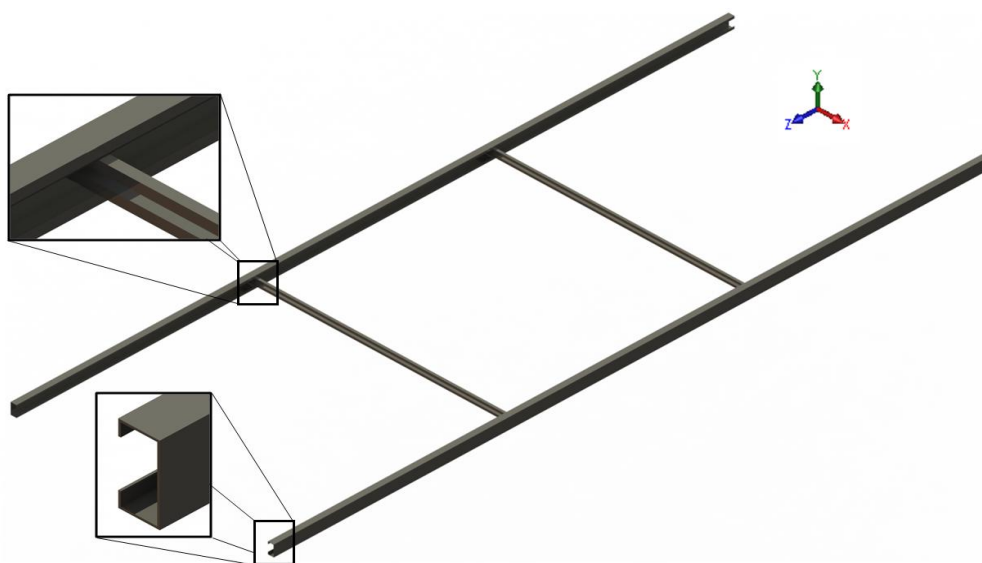
### 7.3.1 Estrutura do subsistema de ligação

O subsistema de ligação apresenta-se como um conjunto que, essencialmente, tem como função garantir a ligação entre os dois subsistemas em forma de torre garantido que a estrutura auxiliar passa a ser considerada como um sistema apenas deixando de ser dividida em diferentes conjuntos. Deste modo é garantido um maior controlo e facilidade no manuseamento de toda a estrutura auxiliar.

Sendo um subsistema que não está sujeito a grandes esforços, a geometria deste pode ser relativamente simples, sendo principalmente relevante garantir a rigidez estrutural e resistência a momentos de flexão criados sobretudo devido ao facto de ser um conjunto com um elevado comprimento. A estrutura do subsistema de ligação assemelha-se a uma estrutura em treliça.

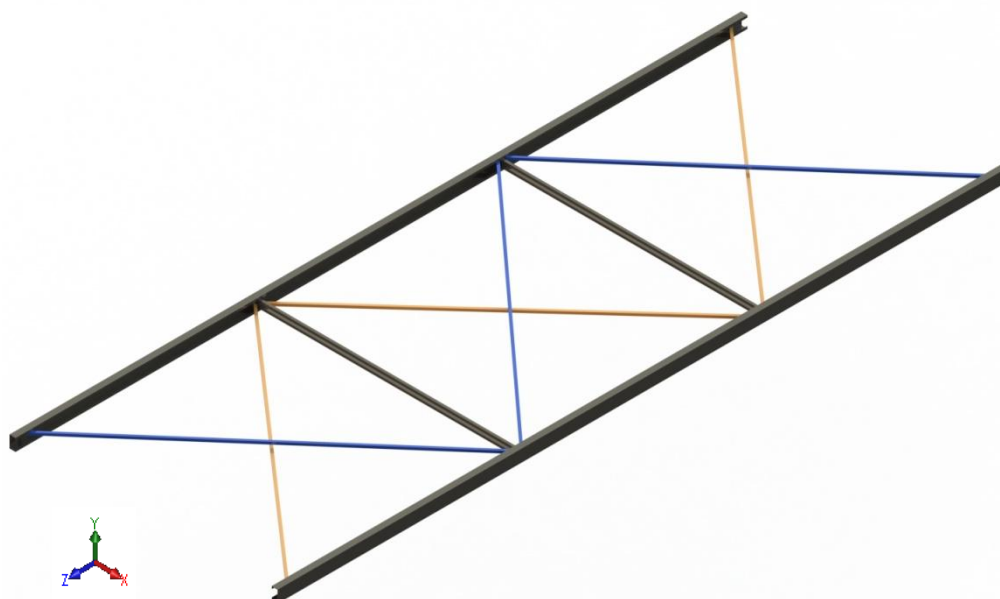
O conjunto de ligação é composto por dois perfis em C com dimensões 100x50x20 mm com uma espessura de 3 mm. O comprimento de ambos os componentes é também idêntico e igual a 6 metros. O uso de um perfil em C para compor as longarinas do subsistema prende-se sobretudo pelo facto de este ser bastante versátil, fácil de instalar e garantir uma elevada resistência a um baixo peso.

Por oposição aos componentes em C, são colocados 4 perfis tubulares de secção quadrada que funcionam como transversinas. Estes perfis têm de dimensão lateral, espessura e comprimento, respetivamente, 20, 2 e 2194 mm sendo soldados à superfície interior dos perfis em C. A ligação dos tubos quadrados com a chapa em forma de C não é realizada nas abas desta última de modo a tornar o sistema mais rígido e a evitar possíveis deformações nos perfis que servem como longarinas. Na Figura 7.19 é possível observar a estrutura de ligação composta pelas duas longarinas e quatro transversinas.



**Figura 7.19: Corpo principal da estrutura de ligação com destaque para o perfil em C e ligação dos perfis quadrados a este.**

Aos perfis que funcionam como transversinas, de modo a reforçar a rigidez e estabilidade da estrutura, são soldados outros perfis tubulares quadrados (espessura e comprimento iguais a, respetivamente, 20 e 2 mm) dispostos na diagonal criando o efeito de cruz. Dado o facto dos perfis quadrados, dispostos perpendicularmente às longarinas, se situarem em dois planos paralelos distintos, os novos perfis quadrados colocados obliquamente, estão também em dois planos diferentes e sempre em sentido contrário ao perfil subjacente a este (de modo a criar uma cruz). A distinção entre os dois grupos de perfis tubulares quadrados dispostos obliquamente é visível na Figura 7.20.



**Figura 7.20:** Grupos de perfis tubulares quadrados adicionados obliquamente ao sistema de ligação (cores ilustrativas meramente utilizadas para distinguir ambos os grupos).

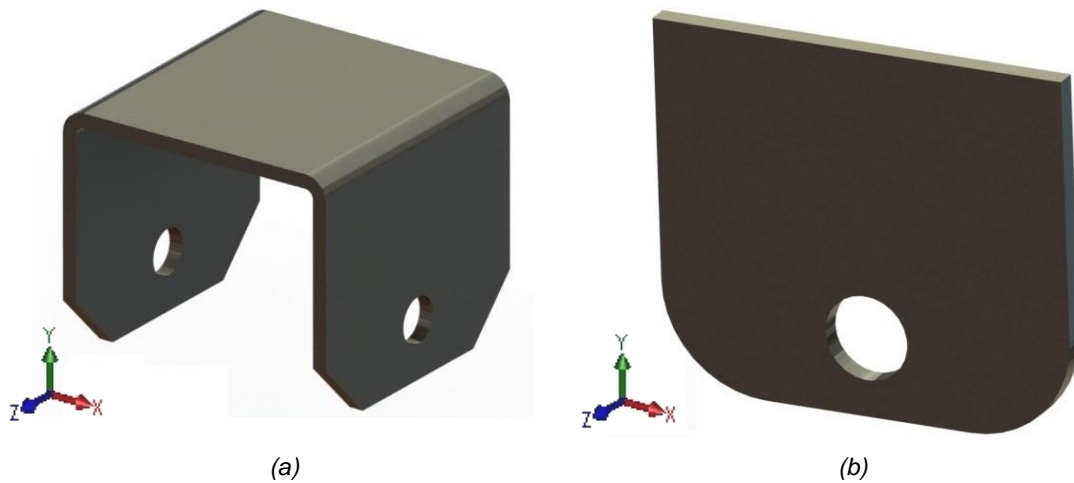
### 7.3.2 Montagem do subsistema de ligação ao subsistema em forma de torre

Para ser possível ligar o subsistema de ligação ao subsistema em forma de torre e assim tratar a estrutura auxiliar como um sistema apenas, é necessário adicionar certos componentes a ambos os conjuntos.

O módulo de ligação irá juntar-se à base do sistema em torre no intervalo deixado entre os componentes que funcionam como travamentos dos perfis centrais e dos cantos. Para isso é soldado a cada extremidade dos componentes em forma de C uma chapa duplamente quinada que permite o encaixe nos perfis retangulares que formam a base do sistema em torre. Esta chapa tem também um furo passante de diâmetro 16 mm por onde é feito passar um pino que garante a fixação dos dois módulos (Figura 7.21a).

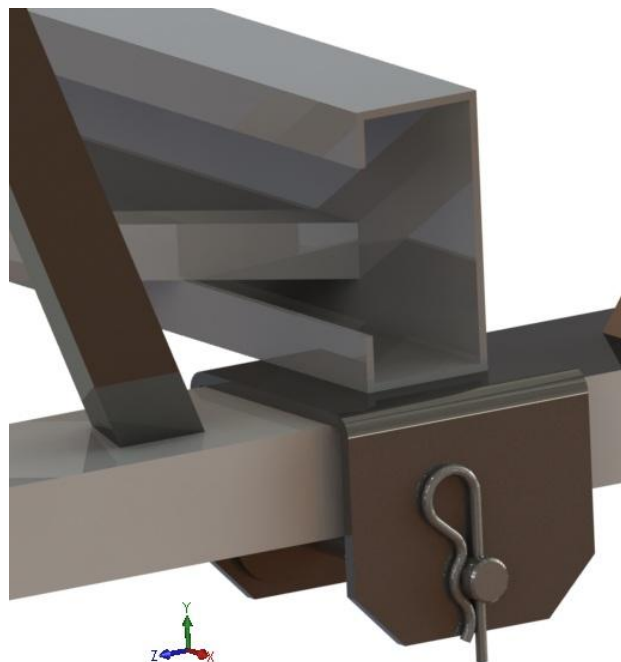
Na base do conjunto em forma de torre, na zona onde o subsistema de ligação encaixa, são soldadas duas pequenas chapas de aço (uma de cada lado do perfil que forma a

base) que, tal como a chapa quinada do sistema de ligação, também têm um furo passante de diâmetro 16 mm (Figura 7.21b).



**Figura 7.21: Componentes que garantem a fixação dos dois módulos; (a) Chapa quinada do subsistema de ligação; (b) Chapa do subsistema em forma de torre.**

Para realizar a montagem dos dois conjuntos, depois de tornar concêntricos os furos idênticos de ambos os componentes de fixação, é feito passar um pino que garante o acoplamento dos dois módulos. Este pino é fixo na sua posição por um troço de mola beta idêntico ao apresentado na Figura 6.14 tal como é possível observar na Figura 7.22.



**Figura 7.22: Sistema de ligação (semelhante nas 4 extremidades) usado no acoplamento dos dois subsistemas.**

Em relação ao peso do subsistema de ligação, com a adição da chapa quinada, o peso total deste conjunto passa a ser de, sensivelmente, 97 kgf, verificando mais uma vez que está

abaixo do peso máximo por módulo imposto pela empresa, cumprindo deste modo um dos requisitos de projeto.

Realizada a ligação das quatro extremidades do subsistema de ligação com os dois subsistemas em forma de torre, a estrutura auxiliar fica completa e pronta a utilizar (Figura 7.23).



**Figura 7.23: Estrutura auxiliar, composta pelos três distintos subsistemas, já devidamente montada.**

## 7.4 Posicionamento ideal da estrutura no local de aterragem

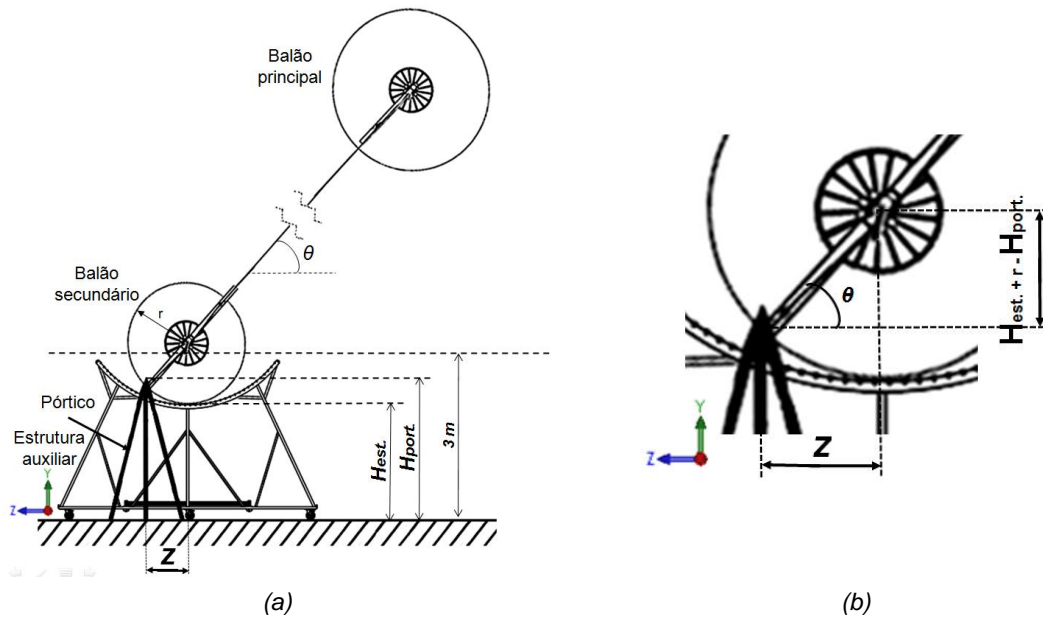
De modo a garantir que o processo de aterragem dos vários balões que constituem a plataforma é realizado sem colocar os componentes e a estrutura auxiliar em risco, o correto posicionamento desta estrutura no local de aterragem ganha uma elevada importância.

Para não ocorrerem danos significativos na estrutura, é importante que os balões pousem primeiramente sempre na zona mais baixa e central das bases em forma de berços. Caso a estrutura seja colocada a uma distância superior à recomendada, os balões embatem numas das extremidades da base criando um momento na estrutura podendo danificá-la e até, em caso extremo, virá-la (este último cenário apenas ocorre se o valor da força de embate for muito superior ao calculado no subcapítulo 7.5.1, ou seja, se o processo de aterragem for levado de forma incorreta e com velocidades de vento e velocidades angulares dos balões demasiado elevadas). Se a posição da estrutura estiver a uma distância menor, os balões embatem numa das quinas da base em forma de berço, podendo danificarem-se e até romper.

O cálculo da distância recomendada entre o plano que passa no centro dos pórticos e o plano de simetria do subsistema em forma de torre da estrutura auxiliar, representado por  $z$  na Figura 7.24, é realizado com base na altura da estrutura, altura dos pórticos, diâmetros dos



dois tipos de balões e ângulo de equilíbrio dos balões com a horizontal que, uma vez que os cabos principais deixam de ter relevo no processo de aterragem (e de descolagem), passa a ser o ângulo descrito pelos cabos auxiliares com o solo,  $\theta$ .



**Figura 7.24: Processo de aterragem com recurso à estrutura auxiliar; (a) Esquema do processo; (b) Representação da distância recomendada,  $z$ , entre a estrutura e os pórticos.**

Pela análise da Figura 7.24b temos que a distância  $z$  é obtida por uma razão trigonométrica:

$$z = \frac{(H_{est.} + r) - H_{port.}}{\tan \theta} \quad (7.1)$$

Com  $H_{est.}$  sendo a altura desde do solo até ao ponto mais baixo da base em berço da estrutura,  $r$  o raio do balão a aterrar,  $H_{port.}$  a altura do pórtico e  $\theta$  o ângulo de equilíbrio que os cabos auxiliares e balões fazem com a horizontal.

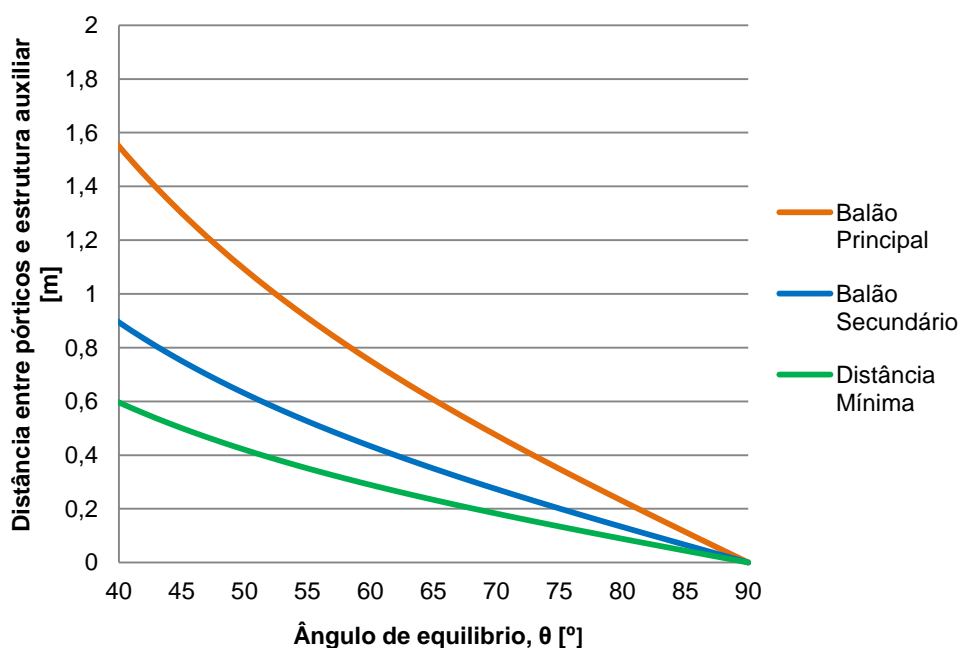
Uma vez que os valores dos termos  $H_{est.}$ ,  $r$  e  $H_{port.}$  são sempre constantes, a distância  $z$  apenas irá variar devido ao ângulo de equilíbrio  $\theta$ . Para  $H_{est.}$ ,  $H_{port.}$  e  $r$  temos então, respetivamente, os valores de 2 metros, 2,5 metros e 1,25 ou 1,8 metros (conforme se trate de um balão secundário ou do principal). Com estes valores é possível verificar também que o ponto por onde os balões são recolhidos nunca fica a uma altura do solo inferior a 3 metros (distância mínima é de 3,25 metros no caso dos balões secundários) cumprindo deste modo o requisito imposto no subcapítulo 5.3.1.

Considerando que o processo de aterragem é levado com velocidades máximas de vento na ordem dos 7 m/s e com apenas o balão principal com velocidade angular (e igual a 35 RPM), temos para uma plataforma constituída por quatro balões o ângulo de equilíbrio,  $\theta$ , igual a 44,22° como já calculado no subcapítulo 5.2, sendo este valor o representante do caso



mais desfavorável, uma vez que, para velocidade de vento menores ou à medida que são desacoplados os balões da plataforma, o valor do ângulo de equilíbrio tende a aumentar, o que promove também a diminuição da distância  $z$  devido ao facto desta ser inversamente proporcional à tangente do ângulo como visível na equação (7.1).

Considerando valores do ângulo de equilíbrio entre 40 e 90 graus, substituindo os valores na equação (7.1) é possível construir o gráfico da Figura 7.25 que traduz a distância ideal para cada um dos tipos de balões conforme o valor do ângulo de equilíbrio. No mesmo gráfico é visível também a distância mínima para cada valor de ângulo que é obtida considerando que o ponto por onde os balões são recolhidos fica exatamente a 3 metros de distância do solo, ou seja, a parcela em numerador é constante e igual a 0,5 metros



**Figura 7.25: Distância ideal e mínima entre pórticos e estrutura auxiliar para cada um dos tipos de balões conforme o valor do ângulo de equilíbrio.**

Analisando o gráfico da Figura 7.25 é verificado, tal como pretendido, que para os dois tipos de balões, para os vários valores de  $\theta$ , a distância ideal é sempre superior à mínima sendo que esta diminui à medida que o ângulo de equilíbrio aumenta, sendo nula quando os balões aterram numa posição completamente vertical ( $\theta = 90^0$ ).

Para o caso limite e mais estudado ao longo da dissertação, isto é, aterragem de uma plataforma constituída por quatro balões, com velocidade de vento igual 7 m/s e sendo o balão principal o único com velocidade angular, e igual a 35 RPM, os valores dos ângulos de equilíbrio aumentam à medida que os balões vão sendo desacoplados promovendo uma diminuição das respectivas distâncias ideais. Para este caso concreto as distâncias  $z$ , tendo em conta o ângulo de equilíbrio e tipo de balão, são apresentadas na Tabela 7.3.

**Tabela 7.3: Valores das distâncias ideais com base no ângulo de equilíbrio e tipo de balão para o cenário de aterragem de uma plataforma constituída por 4 balões (com  $U_{\infty}=7$  m/s e  $\omega=35$  RPM para o balão principal).**

Balão a aterrar	Ângulo de equilíbrio [°]	Distância ideal entre pórticos e estrutura auxiliar [m]
1º Balão secundário de 3	44,22	0,77
2º Balão secundário de 3	49,54	0,64
3º Balão secundário de 3	56,19	0,50
Balão principal	64,49	0,62

Analisando a Tabela 7.3 verifica-se, tal como esperado, a diminuição do valor das distâncias ideais à medida que o valor do ângulo de equilíbrio aumenta com exceção do caso da aterragem do balão principal, onde o valor da distância aumenta quando comparada com o valor calculado anteriormente. Apesar do balão principal se aproximar da estrutura auxiliar numa posição mais vertical que todos os outros balões secundários, a razão para o aumento da distância entre os pórticos e a estrutura prende-se com o facto do balão principal ter um diâmetro superior aos balões secundários, implicando a colocação da estrutura a uma maior distância dos pórticos para, à semelhança de todos os balões, aterrar na zona central da base em berço.

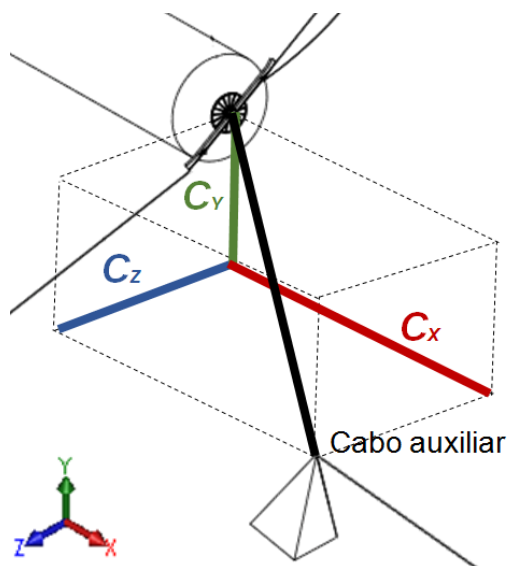
## 7.5 Simulações Numéricas

### 7.5.1 Cálculo da força de embate dos balões

Para os resultados das simulações numéricas serem o mais aproximados possível da realidade, é conveniente calcular o valor exato da força que os balões aplicam na estrutura auxiliar aquando do seu embate durante o processo de aterragem. Esta força aplicada na estrutura pelos balões pode então ser considerada de igual valor à força que os guinchos auxiliares realizam no exato momento em que os balões pousam na estrutura. Deste modo, para chegar ao valor da força de embate, é necessário encontrar a força resultante realizada por cada um dos guinchos. A juntar à força produzida pelos guinchos, existe também a força de impacto originada pelo movimento e inércia do balão, podendo esta ser considerada desprezável uma vez que o balão é deformável e o intervalo de tempo em que se dá o embate é curto, resultando então numa força bastante reduzida. Este carregamento não considerado nas simulações acaba por ser suportado pelos fatores de segurança.

Para calcular a força resultante que cada um dos guinchos realiza quando os balões embatem na estrutura auxiliar, é necessário calcular o comprimento de cabo que ainda não foi recolhido pelos guinchos. Para isso é necessário recorrer ao ângulo de equilíbrio que os cabos

auxiliares fazem com o solo e determinar os comprimentos em  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  desde do ponto onde o balão está a ser puxado até ao ponto onde o pórtico recebe o cabo (ao valor do comprimento obtido é necessário de seguida subtrair 3 metros, valor este que representa o comprimento de cabo que vai desde dos pórticos até ao guincho). Na Figura 7.26 são representadas as três componentes na direção de cada um dos eixos do comprimento do cabo auxiliar desde do balão até ao pórtico que falta recolher.



**Figura 7.26: Componentes na direção dos três eixos do comprimento do cabo auxiliar desde do balão até ao pórtico que falta recolher.**

Independentemente de qual seja o valor do ângulo de equilíbrio, devido ao facto da componente em  $X$ ,  $C_x$ , ser a distância desde do plano central do pórtico até ao ponto onde os balões são puxados, esta será sempre constante e de valor igual a 2 metros, tal como ficou definido no subcapítulo 5.3.1.

A obtenção do valor da componente segundo a direção em  $Y$  é também direta uma vez que o comprimento  $C_y$  é a distância vertical desde do ponto mais elevado do pórtico e o ponto onde os balões são puxados, conceitos já introduzidos no subcapítulo 7.4. Como já apresentado na Figura 7.24, o valor do comprimento  $C_y$  é dado por:

$$C_y = (H_{est.} + r) - H_{port.} \quad (7.2)$$

Com  $H_{est.}$  sendo a altura desde do solo até ao ponto mais baixo da base em berço da estrutura,  $r$  o raio do balão a aterrar e  $H_{port.}$  a altura do pórtico.

Temos então para um balão secundário e principal respetivamente:

$$C_y = (2 + 1,25) - 2,5 = 0,75 \text{ m}$$

$$C_y = (2 + 1,8) - 2,5 = 1,30 \text{ m}$$

O valor da componente do cabo auxiliar na direção  $Y$  é também à semelhança de  $C_x$ , constante e independente do ângulo de equilíbrio dos cabos auxiliares com a horizontal no plano  $YZ$ ,  $\theta$ .

Uma vez conhecida a componente em  $Y$ , o comprimento  $C_z$  é facilmente encontrado uma vez que este representa a distância ideal  $z$  estudada no subcapítulo anterior, isto é, a distância recomendada entre o plano que passa no centro dos pórticos e o plano de simetria da estrutura auxiliar. Para calcular a componente  $C_z$  recorre-se à equação (7.1).

Para o cenário de aterragem de uma plataforma constituída por quatro balões (com velocidade do vento igual a 7 m/s e velocidade angular igual a 35 RPM para o balão principal), os valores dos ângulos de equilíbrio e das componentes  $C_z$  estão resumidos na Tabela 7.3. Com base nesses valores, através da norma das três componentes, é possível calcular o comprimento de cabo auxiliar desde do balão ao pórtico que ainda não foi recolhido aquando da aterragem dos balões na estrutura auxiliar. Na Tabela 7.4 é sumariado todos os valores e o comprimento de cabo auxiliar por recolher ao longo de um processo de aterragem de uma plataforma constituída por quatro balões (com  $U_\infty=7$  m/s e  $\omega=35$  RPM para o balão principal).

**Tabela 7.4: Ângulo de equilíbrio, componentes e comprimento de cabo auxiliar (desde do balão até ao pórtico) por recolher ao longo de um processo de aterragem de uma plataforma constituída por 4 balões (com  $U_\infty=7$  m/s e  $\omega=35$  RPM para o balão principal).**

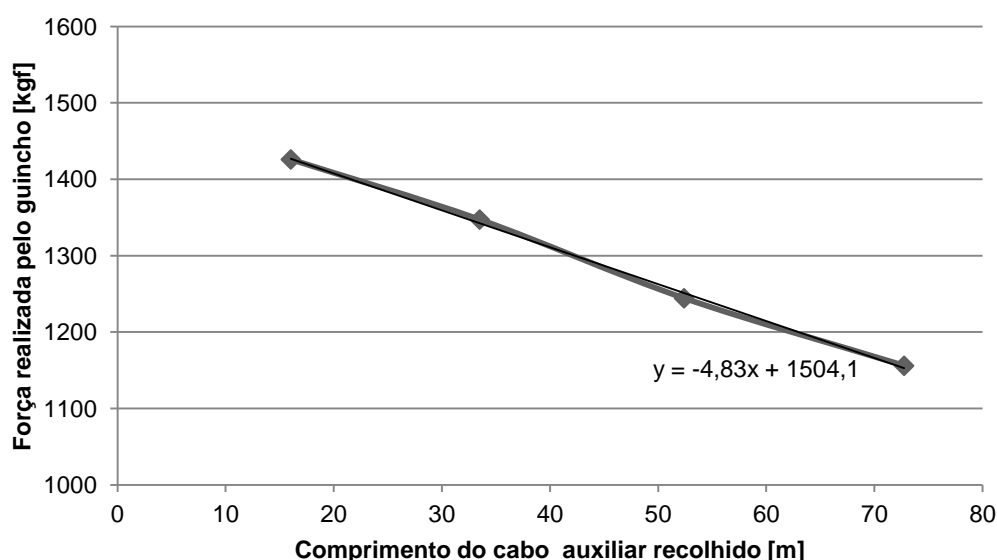
	Balão a aterrar			
	1º Balão secundário de 3	2º Balão secundário de 3	3º Balão secundário de 3	Balão principal
<b>Ângulo de equilíbrio [°]</b>	44,22	49,54	56,19	64,49
<b><math>C_x</math> [m]</b>	2	2	2	2
<b><math>C_y</math> [m]</b>	0,75	0,75	0,75	1,30
<b><math>C_z</math> [m]</b>	0,77	0,64	0,50	0,62
<b>Comprimento de cabo auxiliar por recolher [m]</b>	2,27	2,23	2,19	2,46

Por análise da Tabela 7.4, verifica-se que o cenário mais desfavorável é o caso da aterragem do balão principal, uma vez que o comprimento de cabo auxiliar que falta recolher aquando do seu embate na estrutura é o mais elevado (devido ao facto do balão ter um maior diâmetro embatendo mais rapidamente na estrutura) indicando assim que a força realizada pelos guinchos na altura deste mesmo embate têm o maior valor dos quatro cenários (à medida que o comprimento de cabo armazenado aumenta a força resultante realizada pelo guincho diminui como é visível na Tabela 5.12). Dado este resultados, em cálculos futuros,

apenas é considerado o caso de aterragem do balão principal devido ao facto deste ser o cenário mais adverso.

Considerando que os cabos auxiliares têm um comprimento total de 60 metros, quando o balão principal embate na estrutura auxiliar, já foram recolhidos 54,54 metros (60 metros menos os 2,46 metros calculados e 3 metros de cabo desde do pórtico ao guincho). Conhecendo o comprimento exato de cabo auxiliar recolhido, é possível determinar a força que o guincho realiza nesse exato momento através dos valores sumariados na Tabela 5.12 aquando da definição das especificações dos novos guinchos auxiliares para um cabo de *Dyneema* com diâmetro 6 mm.

Através dos valores do comprimento de cabo recolhido e a respetiva força realizada pelo guincho, é possível representar o gráfico da Figura 7.27 e assim chegar a uma reta que relaciona ambas as variáveis.



**Figura 7.27: Gráfico que relaciona a força realizada pelos guinchos auxiliares com o comprimento de cabo que já foi recolhido.**

Verifica-se então que o declive da reta é -4,83 e a ordenada na origem 1504,1.

Substituindo na equação da reta da Figura 7.27 o valor do cabo já recolhido no caso da aterragem do balão principal na estrutura auxiliar vem:

$$y = -4,83x + 1504,1 = -4,83 \times 54,54 + 1504,1 = 1240,67 \text{ kgf} = 12170,97 \text{ N}$$

Conclui-se assim que a força resultante exercida por cada um dos guinchos auxiliares na aterragem do balão principal, com recurso à estrutura auxiliar, é 12170,97 N.

O valor da força resultante exercida por cada um dos guinchos auxiliares pode ainda ser decomposta nas três componentes na direção de cada eixo tal como é ilustrado na Figura 5.5. Para isso basta repetir o raciocínio seguido no subcapítulo 5.3.1 quando foram estudadas

as forças realizadas pelos guinchos. Para obter as componentes  $F_X$ ,  $F_Y$  e  $F_Z$  basta então resolver o seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} F_G &= \sqrt{F_X^2 + F_Y^2 + F_Z^2} \\ F_Z &= \frac{F_Y}{\tan \theta} \\ F_X &= \frac{F_Y}{\tan \alpha} \end{aligned} \quad (7.3)$$

Com  $F_G$  sendo a força resultante executada pelo guincho,  $\theta$  o ângulo de equilíbrio dos cabos auxiliares com a horizontal no plano YZ,  $\alpha$  o ângulo de equilíbrio dos cabos auxiliares com a horizontal no plano XY e  $F_X$ ,  $F_Y$  e  $F_Z$  as componentes da força na direção dos eixos X, Y e Z, respetivamente.

Para o caso da aterragem do balão principal temos  $\theta = 64,49^\circ$ . No que toca ao ângulo  $\alpha$ , este pode ser calculado à semelhança que do que foi feito no subcapítulo 5.3.1, recorrendo a razões trigonométricas. Vem então para o balão principal:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\left( \frac{3,6}{2} + 2 \right) - 2,5}{2} \right) = 33,02^\circ$$

Substituindo o valor da força resultante e dos dois ângulos de equilíbrio no sistema de equações (7.3), as componentes das forças obtidas são:

$$F_X = 9876,66 \text{ N}$$

$$F_Y = 6418,88 \text{ N}$$

$$F_Z = 3063,02 \text{ N}$$

Para realizar as simulações numéricas é tido em consideração que a componente da força dos guinchos na direção X não realiza relevantes esforços na estrutura uma vez que esta é aplicada paralelamente aos eixos dos rolos. Deste modo, para calcular a força de embate provocada pelo balão principal ao aterrar, é apenas tido em consideração as componentes  $F_Y$  e  $F_Z$ . A força de embate é então igual a:

$$F_{embate} = \sqrt{F_Y^2 + F_Z^2} = \sqrt{6418,88^2 + 3063,02^2} \cong 7112,25 \text{ N} = 725 \text{ kgf}$$

Em relação à direção da força de embate, esta descreve com a horizontal um ângulo  $\theta$  de  $64,49^\circ$ . No que diz respeito ao sentido, dado a componente  $F_Y$  tem sentido de cima para baixo, o sentido da força de embate é também de cima para baixo.

### 7.5.2 Resultados das simulações numéricas

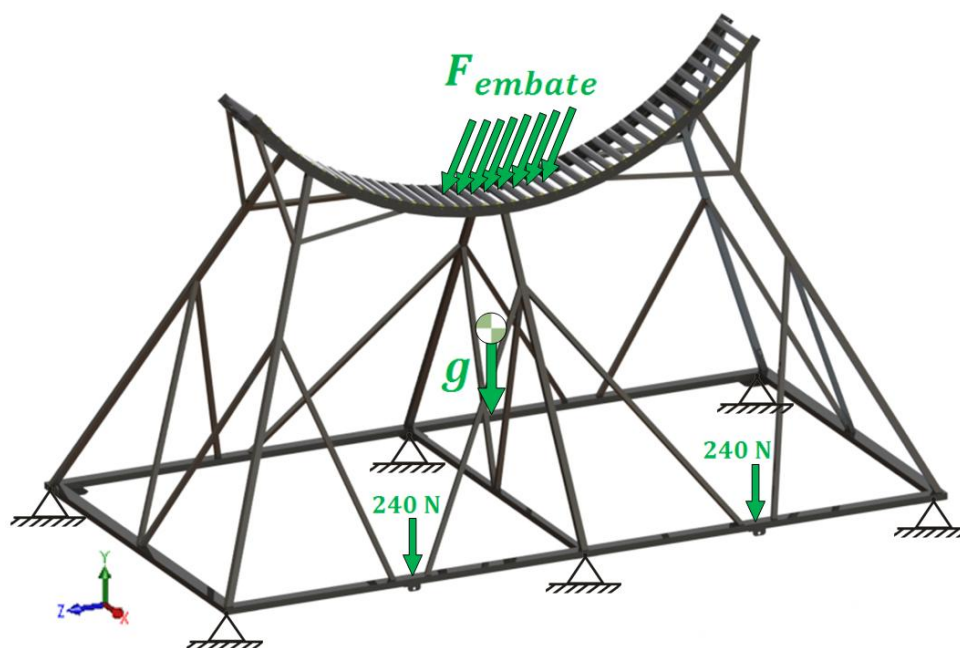
Tal como no estudo dos sistemas de acoplamento dos balões à plataforma, para realizar as simulações numéricas da estrutura auxiliar, é recorrido ao *software* *Ansys Workbench*. Tendo em mente o objetivo da estrutura e o modo como esta é utilizada, considera-se relevante o estudo de três distintas situações:

- Correta aterragem do balão com embate na zona central da base da estrutura;
- Aterragem defeituosa com embate do balão na extremidade da base da estrutura mais distante no sentido do qual o balão é puxado.
- Aterragem defeituosa com embate do balão na quina da base da estrutura;

Em todos os cenários de simulação, no que diz respeito às condições de fronteira, uma vez que durante o processo de aterragem dos vários balões, a estrutura está imobilizada devido às rodas de transporte travadas, é considerado que a estrutura é fixa pelas 6 chapas de fixação das rodas de transporte (apresentadas na Figura 7.13). Para simplificar as simulações, são removidas da geometria da estrutura determinados componentes como as rodas de transporte, varões redondos e chapas de proteção em forma de U.

Em relação aos carregamentos, é sempre considerada uma força de embate igual a 7112,25 N que pode ser dividida por um determinado número de rolos dependendo do caso em estudo. No maior perfil da base onde liga o subsistema de ligação, é também aplicada, em dois pontos distintos, uma força de 240 N que têm como origem o peso do conjunto de ligação (peso sensivelmente igual a 97 kgf dividido por 4 pontos). Em todos os cenários de estudo é ainda contabilizada a aceleração da gravidade.

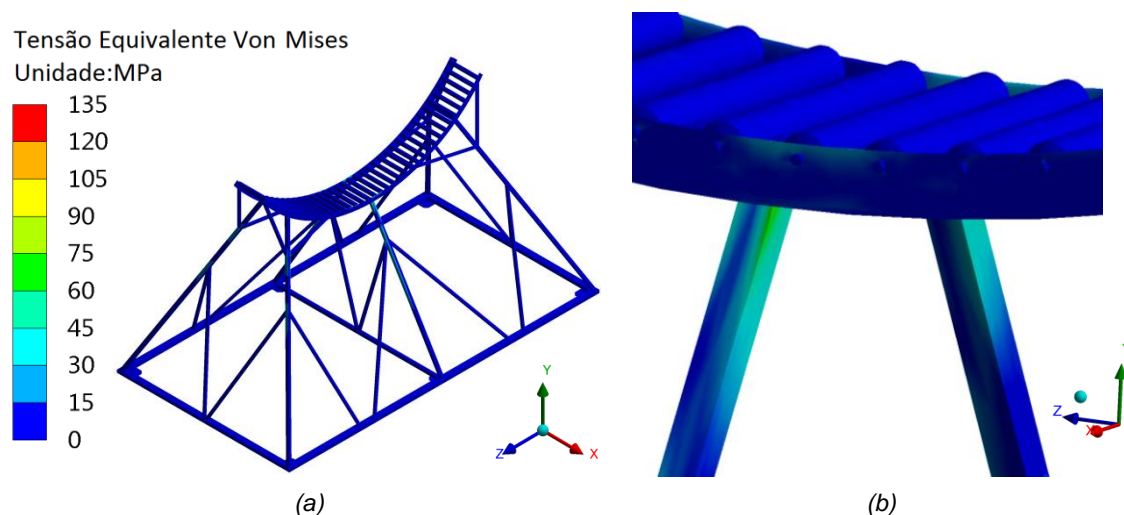
Para o cenário da correta aterragem do balão principal, a aplicação das várias forças está representada na Figura 7.28.



**Figura 7.28:** Forças aplicadas na estrutura auxiliar durante a correta aterragem do balão principal.

Dado a curvatura da base em forma de berço ter um raio bastante próximo do raio do balão principal (2 metros para 1,8 metros do balão), é considerado que quando o balão pousa na estrutura, o impacto dá-se inicialmente em apenas em 8 rolos (889 N por cada rolo), sendo que só depois há a deformação e a adaptação do balão à estrutura e o aumento do número de rolos em contacto com este.

Após realizada a simulação numérica, no que diz respeito às tensões originadas na estrutura, obteve-se o resultado apresentado na Figura 7.29.

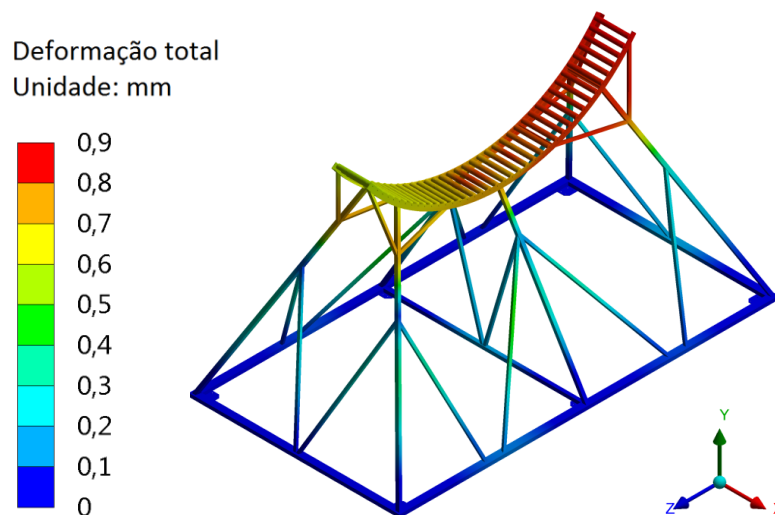


**Figura 7.29: Valores das tensões equivalentes de Von Mises originadas pela correta aterragem do balão principal; (a) Vista geral; (b) Pormenor da zona mais solicitada.**

Como é visível na Figura 7.29, o valor de tensões mais elevado regista-se na zona central da base (nomeadamente nos perfis que a suportam) e tem o valor de, aproximadamente, 80 MPa. Tendo em conta que a tensão de cedência do aço utilizado é de 235 MPa, o fator de segurança mínimo, em relação à cedência é, aproximadamente, 2,94, valor este que prova que para o caso ideal, a estrutura é bastante resistente, podendo ser inclusive sujeita a esforços mais elevados.

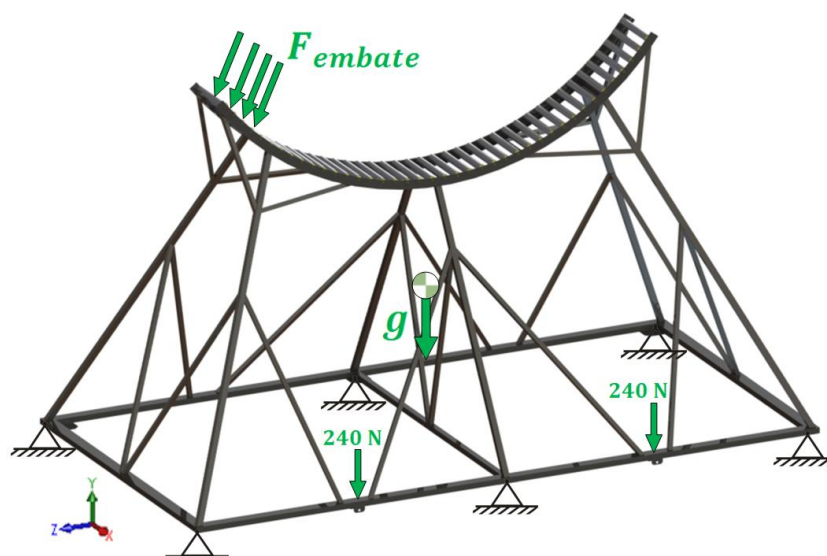
No que diz respeito à deformação e deslocamentos dos componentes, pela Figura 7.30 é possível constatar que este é também bastante baixo, não chegando inclusive, no pior dos cenários, a 1 mm.





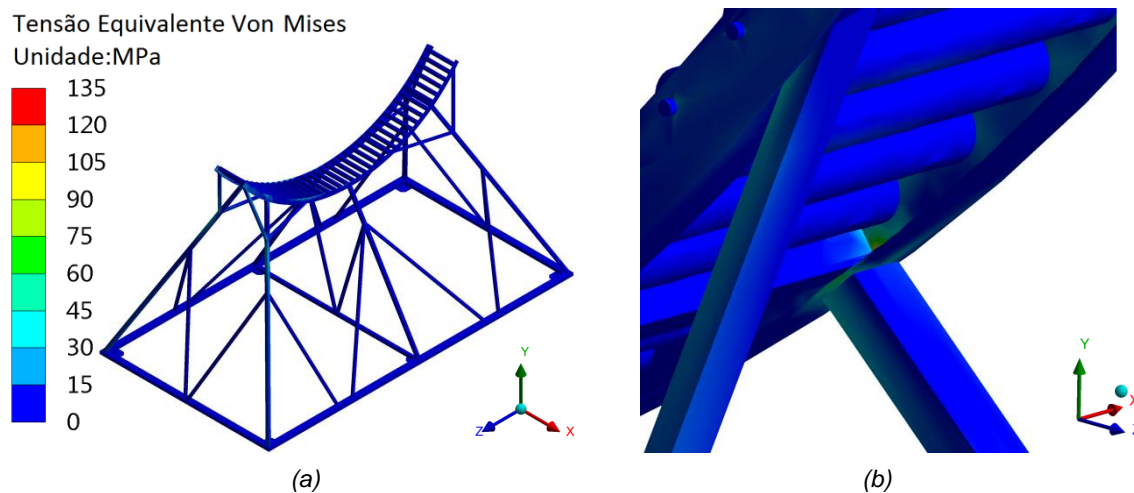
**Figura 7.30: Deformação originada nos componentes pela correta aterragem do balão principal.**

Num dos casos onde a aterragem dos balões é defeituosa, pode ocorrer o embate do balão principal nos rolos da extremidade da base da estrutura mais distante no sentido do qual o balão é puxado. Para realizar a simulação numérica deste cenário é considerado que o balão principal embate nos quatros rolos mais próximos da extremidade da base, distribuindo a força de embate igualmente por todos os componentes (1778 N por rolo). O modo como as forças são aplicadas neste cenário está representado na Figura 7.31.



**Figura 7.31: Forças aplicadas na estrutura auxiliar devido ao embate do balão principal na extremidade mais distante da base da estrutura.**

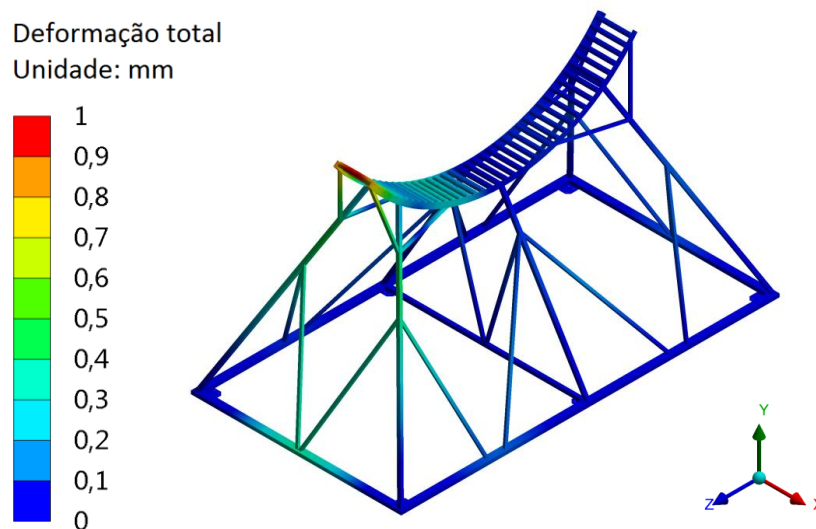
Realizada a simulação numérica para o caso desfavorável da aterragem do balão principal numa das extremidades da base, verifica-se que se obtém, relativamente às tensões originadas na estrutura, uma concentração mais elevada nas zonas de contacto dos reforços com os perfis de canto da extremidade onde o balão embate. O valor mais elevado de tensão registado é no entanto no contacto e ligação dos perfis em T com as abas menores das cantoneiras como visível na Figura 7.32.



**Figura 7.32: Valores das tensões equivalentes de Von Mises originadas pelo embate do balão principal na extremidade mais distante da base da estrutura; (a) Vista geral; (b) Pormenor da zona mais solicitada.**

Verifica-se então pela Figura 7.32 que o valor de tensão mais elevado é cerca de 102 MPa. Relacionando este valor com o material da estrutura e mais concretamente com o dos perfis em T e cantoneiras, conclui-se que o fator de segurança mínimo, em relação à cedência, é de 2,30. Tendo em conta que se está perante um cenário incorreto e que não deve ser comum no processo de aterragem, conclui-se que o valor do fator de segurança obtido é bastante favorável e bom indicativo da resistência da estrutura.

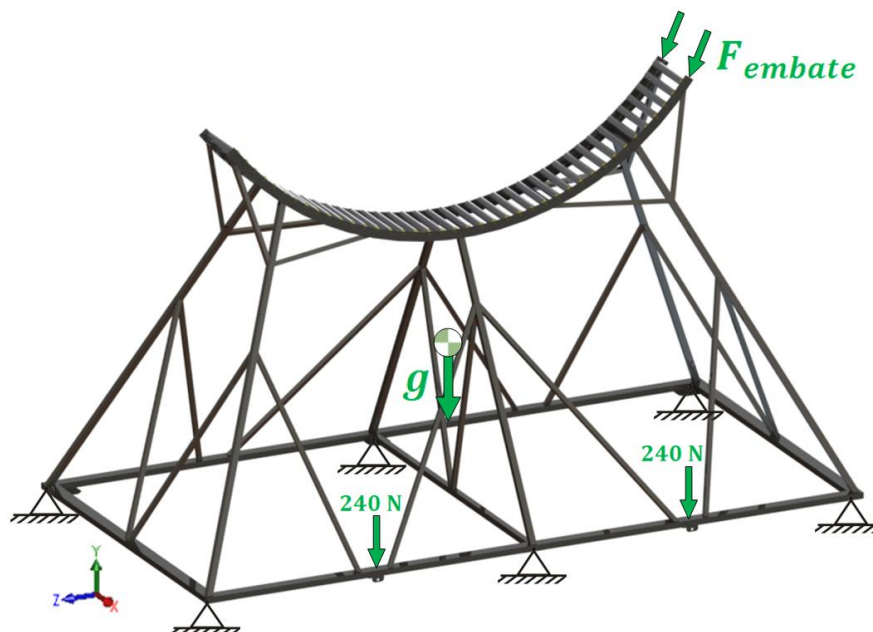
No que toca às deformações dos componentes, o pior cenário dá-se na extremidade da base onde o balão embate, sendo que os deslocamentos rondam, no máximo, 0,95 mm tal como é possível observar na Figura 7.33.



**Figura 7.33: Deformação originada nos componentes pelo embate do balão principal na extremidade mais distante da base da estrutura.**

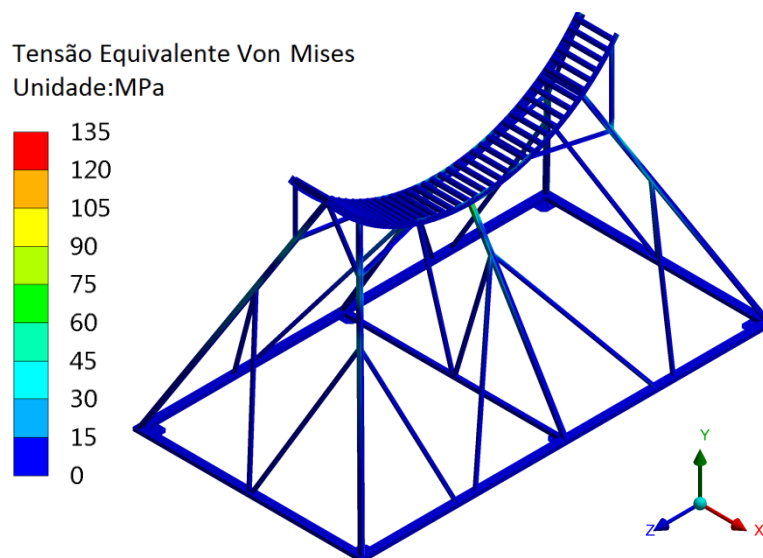
Como último cenário de estudo temos o caso de quando o balão tem novamente uma aterragem defeituosa, ocorrendo o embate deste na quina da base em forma de berço da estrutura.

Admitindo que o balão é rígido e não se rasga nem rompe ao embater na quina da base, a força de embate total é descarregada nas duas cantoneiras (3556,13 N por cantoneira) tal como visível na Figura 7.34.



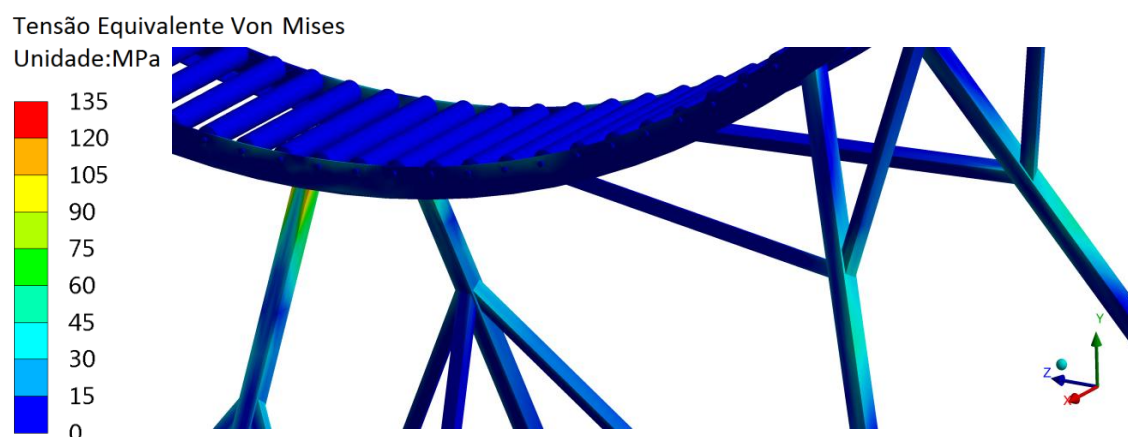
**Figura 7.34:** Forças aplicadas na estrutura auxiliar devido ao embate do balão principal numa das quinas da base da estrutura.

Uma vez corrida a simulação numérica, relativamente às tensões originadas na estrutura, obteve-se o seguinte resultado apresentado na Figura 7.35.



**Figura 7.35:** Valores das tensões equivalentes de Von Mises originadas pelo embate do balão principal numa das quinas da base da estrutura.

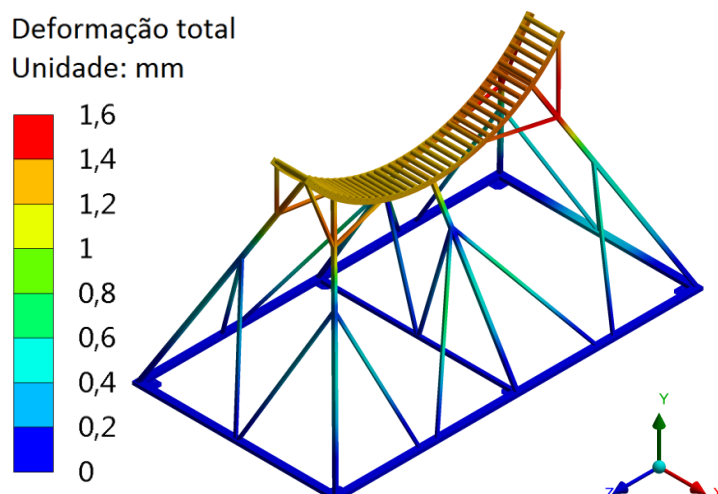
Na Figura 7.36 é detalhado os locais onde as tensões de *Von Mises* equivalentes são mais elevadas.



**Figura 7.36:** Pormenor das zonas onde as concentrações de tensões são mais elevadas no cenário de embate do balão principal numa das quinas da base da estrutura.

Tal como no cenário de aterragem ideal, como é possível observar na Figura 7.36, o ponto onde as tensões são mais elevadas é nos perfis centrais da estrutura na zona onde estes intercetam a base em forma de berço. É de salientar também o aparecimento de tensões nas zonas dos nós dos reforços com os perfis dos cantos. Para este caso de aterragem, o valor de tensão mais elevado ronda o valor de 119 MPa (ligação dos perfis centrais às cantoneiras) que se traduz num fator de segurança, em relação à cedência, de, aproximadamente, 1,97, valor este que, apesar de ser o menor dos três casos em estudo, é na mesma bastante satisfatório para um cenário incorreto e desfavorável de aterragem.

O embate do balão numa das quinas da base é o caso (dos três em estudo) que provoca uma maior deformação dos componentes tal como apresentado na Figura 7.37.



**Figura 7.37:** Deformação originada nos componentes pelo embate do balão principal numa das quinas da base da estrutura.

Como é possível observar na última figura, a base em berço e principalmente os reforços mais perto da zona de embate do balão são os elementos do conjunto com uma maior deformação, todavia, o valor deste deslocamento ronda, no caso mais desfavorável, os 1,5 mm, valor este bastante reduzido e sem influência no funcionamento da estrutura.

# 8

## Conclusões e trabalhos futuros

Com base no trabalho desenvolvido ao longo da dissertação e nos objetivos definidos pela empresa, é possível retirar diversas conclusões tanto acerca do conjunto e da ideia de uma plataforma constituída por múltiplos balões, como dos sistemas projetados.

No que diz respeito à ideia de uma plataforma constituída por múltiplos balões, conclui-se que esta nem sempre vai de encontro ao que a empresa procura uma vez que existem cenários onde a força de sustentação resultante quando adicionados balões secundários não é suficiente para compensar o peso adicional destes mesmos balões. Verificou-se então que poderá apenas ser vantajoso o acoplamento de balões secundários com rotação imposta uma vez que há a garantia do aumento da força resultante total por unidade de massa. Todavia, constatou-se também que para cenários extremos, com velocidades máximas de vento e de rotação dos balões, a força resultante gerada pela plataforma é de tal forma elevada que ultrapassa o limite que os cabos de *Dyneema* conseguem suportar sem romper. Deste modo conclui-se que é importante haver um equilíbrio entre a velocidade angular imposta aos balões com a velocidade do vento, sendo recomendado que à medida que o vento sopra mais forte, seja reduzida a velocidade de rotação dos balões. Em casos futuros, caso a plataforma seja composta por um número crescente de balões, é recomendado que se opte por cabos de *Dyneema* com um diâmetro mais elevado de modo a suportar uma maior força de tração.

Verificou-se também que as velocidades do vento e de rotação dos balões que constituem a plataforma são bastante importantes nos processos de aterragem e descolagem. Através dos resultados obtidos é possível concluir que, sempre que possível, os processos de descolagem e de aterragem devem ser realizados com ventos reduzidos e velocidade angular do balão principal baixa de modo a forçar um aumento do valor do ângulo de equilíbrio dos

balões com o solo. Este aumento do ângulo é traduzido numa descida e numa aterragem segundo uma direção mais vertical (e assim mais segura) dos balões.

No que toca aos processos de descolagem e aterragem propriamente ditos de uma plataforma constituída por múltiplos balões, constatou-se que existem diversas soluções e cenários distintos para os realizar. Porém, dada a complexidade de todo o sistema, verificou-se que a melhor proposta passa pelo acoplamento e pelo desacoplamento individual dos vários balões recorrendo para isso a uma estrutura auxiliar.

Acerca dos sistemas de acoplamento dos balões à plataforma, conclui-se que estes devem ter em conta cada tipo de balão e se estes têm rotação imposta ou não. Através das simulações numéricas, foi validada a utilização dos três conjuntos projetados, uma vez que todos eles suportam os esforços aplicados e não têm deformações demasiado elevadas e que coloquem em causa o correto funcionamento da plataforma. O fator de segurança mínimo, em relação à cedência, surge na peça com dois olhais do balão secundário com rotação onde é fixa a peça de ligação superior sendo o valor obtido igual a 1,19 (cenário com velocidade de vento e de rotação máximas dentro do que o sistema suporta). Apesar de ser um valor substancialmente baixo, é importante recordar que este surge num cenário bastante desfavorável e incomum, podendo concluir-se desta forma que o sistema, mesmo assim, é bastante seguro para condições normais de funcionamento. O sistema para este balão apenas irá danificar-se caso não sejam seguidas as recomendações e não haja o equilíbrio entre a velocidade angular dos balões com a velocidade do vento já referido. É importante realçar porém que os conjuntos de acoplamento projetados nesta dissertação apenas funcionam para o caso onde são utilizados diversos pares de cabos principais (tantos pares como o número de balões da plataforma) ao invés de dois cabos passantes desde o *Bridle Point* até ao balão principal. O recurso a vários cabos de *Dyneema* é recomendado uma vez que permite uma maior simplificação dos sistemas de acoplamento para além de permitir a alteração da distância entre balões de uma forma muito mais simples e direta.

Quanto à estrutura auxiliar dos processos de descolagem e de aterragem dos balões, verifica-se que esta cumpre os requisitos da empresa uma vez que o seu peso é inferior ao máximo definido e, o mais importante de tudo, permite tanto a aterragem e a descolagem dos vários balões que constituem a plataforma, como a sua rotação uma vez assentes na estrutura. O sistema projetado foi validado através das simulações numéricas realizadas para três cenários distintos, onde o fator de segurança mínimo, em relação à cedência, apresenta o valor de 1,97, resultado este bastante satisfatório uma vez que está associado a um cenário onde ocorre um impacto incorreto do balão principal (embate numa das quinas da base da estrutura). Tanto no caso da estrutura auxiliar como no dos sistemas de acoplamento dos balões à plataforma, no que toca às simulações numéricas realizadas, foram desprezados erros oriundos da dificuldade de construção da malha de elementos finitos em geometrias complexas e do contacto incorreto entre componentes. Assim sendo, concentrações de tensões devido ao contacto de componentes com base em arestas vivas foram desprezadas.

Com o concluir da dissertação ficaram ainda patentes alguns estudos e projetos que podem ser levados e realizados no futuro. Algumas sugestões de trabalhos futuros são:

- Estudo comparativo e detalhado das vantagens e desvantagens entre uma plataforma constituída por diversos balões e apenas por um balão;
- Estudo mais detalhado e aprofundado das hipóteses 1 e 2 (para solucionar o problema da descolagem e da aterragem de uma plataforma ancorada constituída por múltiplos balões) apresentadas nesta dissertação de modo a entender se estas, com determinadas alterações, poderão apresentar mais vantagens e ser também equacionadas e utilizadas pela empresa;
- Otimização topológica dos componentes projetados e dos sistemas de acoplamento dos balões à plataforma;
- Fabrico da estrutura auxiliar desenvolvida nesta dissertação e realização de testes e estudos experimentais;
- Alteração do modo de fixação da base em forma de berço à estrutura auxiliar desenvolvida nesta dissertação e adição de outros componentes (como atuadores pneumáticos) tornando possível a rotação da base em forma de berço de modo a facilitar o processo de aterragem dos balões que constituem a plataforma;
- Conceção de uma nova estrutura auxiliar extra (que se ligue à estrutura projetada nesta dissertação) composta por insufláveis que permita o primeiro embate dos balões, evitando deste modo que haja o embate dos aeróstatos com as quinas da base da estrutura desenvolvida.





# Referências Bibliográficas

- [1] Omnidea Lda. *High Altitude Platforms*. Acedido em Janeiro de 2018, disponível em <http://omnidea.net/site/index.php/research/hap>.
- [2] Omnidea Lda. *Omnidea BAP-20-600 DataSheet*. Acedido em Janeiro de 2018, disponível em [http://omnidea.net/site/images/stories/Products/PT\\_Monitoring\\_Platforms/Omnidea%20BAP-20-600%20DataSheet%20-%20V1%2001.2015.pdf](http://omnidea.net/site/images/stories/Products/PT_Monitoring_Platforms/Omnidea%20BAP-20-600%20DataSheet%20-%20V1%2001.2015.pdf).
- [3] Perkovic, U., Silva, P., Ban, M., Kranjcevic, N. e Duic, N. (2013). *Harvesting high altitude wind energy for power production: The concept based on Magnus' effect*, *Applied Energy*, vol. 101, pp. 151-160.
- [4] White, F. (1999) *Fluid Mechanics*. 4ª Edição, McGraw-Hill, Estados Unidos da América.
- [5] Ahres, U., Diehl, M e Schmehl, R. (2014). High Altitude Wind Energy from a Hybrid Lighter-than-Air Platform Using the Magnus Effect. *Airborne Wind – Green Energy and Technology*, Berlim, pp. 491-500.
- [6] COMEUP. *Products, Electric Winch CP-500T*. Acedido em Abril de 2018, disponível em <http://www.comeupwinch.com/pro/detail.php?pid=239&cid=105&f=#.WsTxc4jwa70>.
- [7] Hampidjan. *Dynice Data*. Acedido em Janeiro de 2018, disponível em <http://www.hampidjan.is/Media/dynice-data-4pages-usa-lres1.pdf>.
- [8] Lankhorst. *Products-Rope-Lanko®Force*. Acedido em Janeiro de 2018, disponível em <http://www.lankhorstropes.com/Maritime/Products/ropes/LANKOFORCE>.
- [9] Four Wheeler Network. (2012). *Steel winch cable vs synthetic rope*. Acedido em Maio de 2018, disponível em <http://www.fourwheeler.com/how-to/129-1212-steel-winch-cable-vs-synthetic-rope/>
- [10] Barry Cordage Ltd. (2010) Publicação: *High Strength Synthetic Fiber Rope Compared to Wire Rope for Helicopter Longline Applications*. Canadá.

- [11] Torrão, D. G. M. (2017). *Conceção e Desenvolvimento de Estrutura Auxiliar das Fases de Aterragem e Descolagem de Plataforma Aérea Ancorada*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Almada, Portugal.
- [12] U.S. Air Force. *Tethered Aerostat Radar System*. Acedido em Janeiro de 2018, disponível em <https://archive.is/20120719065800/http://www.af.mil/information/factsheets/factsheet.asp#selection-557.485-557.529>.
- [13] Makani Power. *Technology*. Acedido em Fevereiro de 2018, disponível em <https://x.company/makani/technology/>.
- [14] Kitemill. *The Principle*. Acedido em Fevereiro de 2018, disponível em [http://kitemill.com/page/53/The\\_principle](http://kitemill.com/page/53/The_principle).
- [15] Altaeros Energies. *Clean Energy*. Acedido em Janeiro de 2018, disponível em <http://www.altaerosenergies.com/energy.html>.
- [16] Shelke, K. e Duraphe, M. (2012) Magenn Air Rotor System (Mars). Em: *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, vol. 2, pp. 1566-1568.
- [17] Satellite Telecom. *The Helikite CRC-Surveillance System*. Acedido em Maio de 2018, disponível em <https://www.satellite-telecom.net/en/crowd-and-riot-control/>.
- [18] LJ Welding Automation. *10TMR Pipe Double-Jointing System: PIPE Fit Up Turning Rolls*. Acedido em Março de 2018, disponível em <https://www.ljwelding.com/10tmr-pipe-double-jointing-system-for-improving-pipe-fit-up-processes>.
- [19] Remke. *Master Caralog 81*. Acedido em Maio de 2018, disponível em <https://www.switchesunlimited.com/specs/remke-master-catalog-2015-222pgs.pdf>
- [20] Rodrigues, L. E. M. J. *Mecânica dos Fluidos Aula 10 - Escoamento Laminar e Turbulento*. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, São Paulo, Brasil.
- [21] Conde, J. M. P. (2015) *Aula Dinâmica de Fluidos I - Análise Dimensional e semelhança - Escoamentos exteriores*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Almada, Portugal.
- [22] COMEUP. *Products, Electric Winch CWG-30375*. Acedido em Maio de 2018, disponível em <http://www.comeupwinch.com/pro/detail.php?pid=245&cid=105&f=#.WxLAnzQvxR2>.
- [23] Maxpull Machinery & Engineering Co. Ltd. *Technical Documents*. Acedido em Maio de 2018, disponível em <http://www.maxpull.co.jp/english/gijitusiryu.htm>.
- [24] Dassault Systems. *Introducing Solidworks*. Acedido em Abril de 2018, disponível em [http://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS\\_Introduction\\_EN.pdf](http://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS_Introduction_EN.pdf).
- [25] Infomet. *Metais & Ligas - Alumínio-Ligas Al-Zn*. Acedido em Junho de 2018, disponível em <http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=55>.
- [26] MakeItFrom. *7075-T6 Aluminum*. Acedido em Junho de 2018, disponível em <https://www.makeitfrom.com/material-properties/7075-T6-Aluminum>.
- [27] Crosby. *Catálogos Crosby*. Acedido em Junho de 2018, disponível em <https://www.thecrosbygroup.com/crosby-catalog/download-catalog/>.
- [28] Global Industrial. *Hinge Split Ring Bt Copper 3/8"*. Acedido em Junho de 2018, disponível em <https://www.globalindustrial.com/p/electrical/pipe-tube-bending-cutting/pipe-and-tubing-hangers/hinge-s-ring-bt-cop-3-8>.

- [29] Kipp. *Contrapino DIN 11024 - K1137*. Acedido em Junho de 2018, disponível em [https://www.kipp.pt/xs\\_db/DOKUMENT\\_DB/www/KIPP\\_DE\\_CH\\_PL/BEDIENTEILE/Datasheet/pt/K11/K1137\\_Datasheet\\_18481\\_Contrapino\\_DIN\\_11024--pt.pdf](https://www.kipp.pt/xs_db/DOKUMENT_DB/www/KIPP_DE_CH_PL/BEDIENTEILE/Datasheet/pt/K11/K1137_Datasheet_18481_Contrapino_DIN_11024--pt.pdf).
- [30] Slingco. (2016) *Catálogo Cable Grip Slingco*. Acedido em Julho de 2018, disponível em [https://www.cablegrip.com/media/pdfs/new\\_brand/SLINGCO\\_Catalogue\\_2016\\_UK\\_v1.6.pdf](https://www.cablegrip.com/media/pdfs/new_brand/SLINGCO_Catalogue_2016_UK_v1.6.pdf).
- [31] Precision Brand. *M4S Micro Seal, Miniature All Stainless Worm Gear Hose Clamp*. Acedido em Julho de 2018, disponível em <https://precisionbrand.com/products/m4s-micro-seal-miniature-all-stainless-worm-gear-hose-clamp-732-58-clamping-diameter-pack-of-10/>.
- [32] Martinho, A. J. A. M. (2012) *Brochura da disciplina Órgãos de Máquinas I*. 3ª Edição, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Almada, Portugal.
- [33] Pecol. *Catálogo Técnico*. Acedido em Julho de 2018, disponível em [https://www.pecol.pt/static/flyers/catalogo\\_tecnico2016.pdf](https://www.pecol.pt/static/flyers/catalogo_tecnico2016.pdf)
- [34] Moisés & Freitas. *Catálogo/Preçário Geral*. Acedido em Julho de 2018, disponível em [http://www.moisesefreitas.pt/catalogos/Roscados\\_Moisesefreitas.pdf](http://www.moisesefreitas.pt/catalogos/Roscados_Moisesefreitas.pdf)
- [35] SKF. *Catálogo SKF bushings, thrust washers and strips*. Acedido em Julho de 2018, disponível em <http://www.skf.com/binary/86-120169/SKF-bushings-thrust-washers-and-strips-1-EN.pdf>.
- [36] Rodrigues, P. J. P. (2014) *Simulação Numérica de Estampagem de Componente para a Indústria Automóvel*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- [37] Cardoso, J. B. (2011) *Brochura - Métodos Computacionais em Engenharia Mecânica*. 1ª Versão, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Almada, Portugal.
- [38] Costa, R. M. X. (2004) *O Uso de Perfis Tubulares Metálicos em Estruturas de Edifícios e sua Interface com o Sistema de Fechamento Vertical Externo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas, Ouro Preto, Brasil
- [39] ArcelorMittal – CONSTRUCTALIA. *Tubo estrutural rectangular, quadrado e redondo*. Acedido em Junho de 2018, disponível em [http://www.constructalia.com/portugues\\_pt/products/estruturas/tubos/tubo\\_estrutural\\_rectangular\\_quadrado\\_e\\_redondo#.WxV9pDQvxR0](http://www.constructalia.com/portugues_pt/products/estruturas/tubos/tubo_estrutural_rectangular_quadrado_e_redondo#.WxV9pDQvxR0).
- [40] Portal Metálica. *Vantagens das Estruturas Tubulares de Aço*. Acedido em Junho de 2018, disponível em <http://www.metalica.com.br/vantagens-das-estruturas-tubulares-de-aco>.
- [41] Ferpinta. *Perfis Ocos Soldados (Estruturais)*. Acedido em Junho de 2018, disponível em <http://www.ferpinta.pt/index.php?cat=52>.
- [42] Reis, A. J. (2008) *Estruturas de Aço. Em: Dimensionamento de Estruturas Metálicas*. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- [43] Cunha, L. V. (2010) *Desenho Técnico*. 15ª Edição, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal.

- [44] Interroll. (2018) *Conveyor Rollers, Rollerdrive, Controls (Catálogo)*. Acedido em Junho de 2018, disponível em [https://www.interroll.com/fileadmin/user\\_upload/Downloads\\_\\_PDF\\_/Rollers/Catalog\\_2018/Conveyor\\_Roller\\_Catalog\\_EN.pdf](https://www.interroll.com/fileadmin/user_upload/Downloads__PDF_/Rollers/Catalog_2018/Conveyor_Roller_Catalog_EN.pdf).
- [45] Miller, J., Morton, J., Gilmore, J. e Chou C. T. (2006) Publicação: *Why HMPE Ropes Should be Considered in Offshore Use as well as Towing and Mooring Applications*. Estados Unidos da América.
- [46] Zivic, F., Babic, M., Mitrovic, S., Adamovic, D. e Pelemis, S. (2013) Friction Coefficient of UHMWPE During Dry Reciprocating Sliding. Em: *Tribology in Industry*. vol. 36, Sérvia, pp. 281-286.
- [47] Elesa. (2013) *Castors and Wheels Catalogue 151.RE (Catálogo)*. Acedido em Julho de 2018, disponível em [https://www.elesa.com/static/sfogliabili/files/RE13\\_ENG\\_WEB.pdf](https://www.elesa.com/static/sfogliabili/files/RE13_ENG_WEB.pdf) Castors and Wheels Catalogue 151.RE
- [48] Budin Ferramentas. *Catálogo - Cinta de Amarração*. Acedido em Junho de 2018, disponível em [http://www.budinferramentas.com.br/loja/produto-103002-1921-cinta\\_de\\_amarracao\\_de\\_carga\\_3\\_toneladas\\_50mm\\_x\\_15\\_mts\\_com\\_catraca](http://www.budinferramentas.com.br/loja/produto-103002-1921-cinta_de_amarracao_de_carga_3_toneladas_50mm_x_15_mts_com_catraca).

# Anexos

Anexo A – Etapas dos processos de descolagem e de aterragem para as três hipóteses apresentadas.

Anexo A1 – Etapas dos processos de descolagem e aterragem da hipótese 1.

Anexo A2 – Etapas dos processos de descolagem e aterragem da hipótese 2.

Anexo A3 – Etapas dos processos de descolagem e aterragem da hipótese 3.

Anexo B – Tabelas referentes ao cálculo dos ângulos de equilíbrio, em função da velocidade do vento, para os dois tipos de balões com e sem rotação imposta.

Anexo C – Cálculo do rácio força resultante/massa e análise das várias configurações e vantagens de acoplar balões secundários à plataforma.

Anexo D – Fluxograma do projeto do bumerangue.

Anexo E – Fluxograma do projeto das peças de ligação.

Anexo F – Dimensões das manilhas utilizadas do fabricante *Crosby*.

Anexo G – Cálculo do comprimento do cabo auxiliar extra.

Anexo H – Tabelas das propriedades mecânicas para parafusos, porcas e pernos de classe métrica em função da classe de resistência e tabela que relaciona a área resistente de parafusos métricos em função do seu diâmetro e passo.

Anexo I – Fluxograma do projeto da estrutura auxiliar dos processos de aterragem e descolagem.

Anexo J – Desenhos técnicos referentes aos sistemas de ligação e acoplamento dos balões aos cabos principais e plataforma.

Anexo K – Desenhos técnicos referentes à estrutura auxiliar dos processos de aterragem e descolagem.

## Anexo A

Neste anexo são apresentadas as etapas de descolagem e de aterragem das três hipóteses para solucionar o problema da descolagem e da aterragem de uma plataforma ancorada constituída por múltiplos balões (apresentadas no capítulo 4).

Dado que a hipótese 3 foi determinada como sendo a mais vantajosa e a utilizar pela empresa, os processos de descolagem e de aterragem dessa solução foram muito mais estudados, resultando deste modo numa lista de etapas muito mais detalhada e pormenorizada.

### **Anexo A1 – Etapas dos processos de descolagem e aterragem da hipótese 1 (Dois guinchos principais e cabos principais paralelos)**

#### **Fase de descolagem:**

- 1) Colocação, com o auxílio de um par de carrinhos, do balão principal na posição conveniente para a descolagem. Nesta fase a plataforma constituída apenas pelo balão principal está ancorada pelos cabos principais e pelos dois cabos auxiliares todos eles frouxos.
- 2) Os guinchos auxiliares começam a desenrolar os cabos auxiliares e o balão principal começa a ascender devido à força de impulsão criada pelo hélio. Já com o balão no ar, volta-se ao local de armazenamento com os carrinhos para ir buscar um balão secundário.
- 3) Antes dos cabos principais ficarem completamente tracionados (e com os auxiliares tracionados) são colocadas as peças de ligação nas posições marcadas pelos cabos adicionais que até então eram os únicos componentes a garantir a continuidade dos cabos principais.
- 4) De seguida, o balão secundário é acoplado. O acoplamento passa pela fixação das peças de ligação aos blocos e pelo passar dos cabos nas manilhas da parte inferior e superior dos bumerangues (nesta hipótese, não são utilizados *cable grips*).
- 5) Depois de acoplado o balão secundário à plataforma, o balão principal é colocado em rotação, tracionando os cabos principais.
- 6) Com os cabos principais tracionados, os cabos auxiliares ficam frouxos sendo possível desfazer a ligação das suas pontas dos guinchos auxiliares. Estas pontas são fixas, manualmente, nas extremidades superiores dos bumerangues do balão acabado de acoplar. Ao mesmo tempo, as pontas dos cabos auxiliares do novo balão secundário da plataforma são ligadas aos guinchos auxiliares de modo a auxiliar o processo de descolagem deste balão.
- 7) Caso se pretenda adicionar mais balões à plataforma são repetidos os passos 3, 4, 5 e 6 passando os cabos auxiliares do novo balão a ocuparem a posição dos cabos

auxiliares do balão anteriormente acoplado. Se for o caso, os balões secundários podem ser colocados em rotação.

- 8) Acoplados todos os balões pretendidos, é desfeita a ligação das pontas dos cabos auxiliares do último balão aos guinchos auxiliares. Estas pontas são de seguida fixas, manualmente, nos cabos principais.
- 9) Com a rotação dos balões da plataforma imposta através dos motores, os cabos principais são continuamente tracionados e a plataforma ascende.

#### **Fase de aterragem:**

- 1) Através dos guinchos principais, é iniciada a recolha dos cabos principais. Na fase de aterragem, a velocidade angular dos balões secundários com rotação imposta é interrompida de modo a diminuir a força de sustentação criada pelo efeito de *Magnus*. O balão principal é o único que continua com rotação, porém com uma velocidade angular muito mais baixa.
- 2) Quando possível de alcançar, são recolhidos as pontas dos cabos auxiliares do balão mais baixo sendo de seguida feita a ligação destas aos dois guinchos auxiliares por parte de um operador.
- 3) É iniciada a recolha dos cabos auxiliares através do enrolamento nos guinchos. Os cabos principais estão tracionados uma vez que os guinchos principais continuam a recolher os cabos.
- 4) Quando o balão chega a uma altura possível de alcançar, e estando tracionado por quatro cabos, é desacoplado da plataforma, desfazendo-se as ligações das peças de ligação. Os cabos auxiliares do balão imediatamente acima são também desacoplados dos bumerangues e são ligados a um suporte nos pórticos de modo a serem guardados.
- 5) Depois de desacoplado o balão, os guinchos auxiliares dão cabo permitindo que os cabos principais subam de forma suave evitando esticões bruscos. Ao mesmo tempo, o balão desacoplado é transportado para o local de armazenamento com auxílio de dois carrinhos.
- 6) Os guinchos principais reiniciam a recolha dos cabos principais de modo a tracionar estes.
- 7) Depois de desenrolado todo o cabo auxiliar, e com estes frouxos, são retirados dos guinchos correspondentes passando a ligar a estes as pontas dos cabos auxiliares do balão seguinte a aterrar que até ao momento tinham sido guardadas nos pórticos. As pontas dos cabos auxiliares que foram retiradas dos guinchos são seguras por um operador.
- 8) Feitas as ligações, todos os quatro guinchos puxam os cabos auxiliares e principais de forma coordenada de modo a baixar o seguinte balão secundário.

- 9) Ao enrolar os cabos principais, quando as peças de ligação e consequentes pontas dos cabos auxiliares, do primeiro balão se aproximam dos guinchos, estas são removidas desfazendo as ligações das manilhas. Os cabos adicionais que anteriormente contornavam a peça de ligação passam a garantir a continuação dos cabos principais. Deste modo é permitido que os cabos enrolem no tambor dos guinchos. As peças, manilhas e cabos auxiliares são armazenados manualmente.
- 10) Caso seja necessário continuar a aterrar os balões secundários, são repetidos os passos 4, 5, 6, 7, 8 e 9 até serem desacoplados todos os balões secundários que façam parte da plataforma.
- 11) Para aterrar o balão principal, depois de interrompida a rotação, inicia-se a recolha dos cabos principais e auxiliares através do enrolamento nos guinchos. Caso se pretenda, a plataforma pode ser forçada a alinhar um dos topos ao vento (diminuindo a área frontal exposta ao vento e consequentemente as forças aerodinâmicas), embatendo de seguida numa estrutura auxiliar de aterragem.
- 12) Independentemente da aterragem ser feita com um topo ou com a face lateral alinhada ao vento, todo o processo termina com a arrumação do último balão e todos os componentes num local de armazenamento e segurança.



**Anexo A2 – Etapas dos processos de descolagem e aterragem da hipótese 2  
(Plataforma tratada como uma só com descolagem e aterragem simultânea de balões)**

**Fase de descolagem**

- 1) Todos os balões são acoplados à plataforma ainda no solo.
- 2) Colocação, com o auxílio de carrinhos, da plataforma constituída pelos vários balões na posição conveniente para a descolagem. Nesta fase, tanto os cabos principais como os cabos auxiliares estão frouxos. É garantido também inicialmente que o *Bridle Point* está pousado no solo com o auxílio de um outro guincho.
- 3) Os guinchos auxiliares começam a desenrolar os cabos auxiliares e o balão principal começa a ascender devido à força de impulsão criada pelo hélio.
- 4) Já com o balão principal no ar, é feita a ligação dos cabos auxiliares extra num suporte nos pórticos junto ao solo de modo a segurar a plataforma e a evitar que os cabos subam.
- 5) Com os cabos auxiliares do balão principal frouxos, é desfeita a ligação nos guinchos e ligados a estes os cabos auxiliares do balão secundário imediatamente abaixo do balão principal.
- 6) Antes de retirar as cintas que prendem os balões aos carrinhos, são acopladas aos bumeranges do balão secundário mais próximo do principal as pontas dos cabos auxiliares do balão principal anteriormente desacoplados dos guinchos.
- 7) O balão principal é colocado em rotação. Neste instante o *Bridle Point* está ancorado pelo cabo auxiliar e pelo cabo principal frouxo que permite a passagem de energia elétrica.
- 8) Ao serem tracionados os cabos principais graças ao balão principal, e com o auxílio dos guinchos auxiliares, os balões secundários começam a subir já depois de removidas as cintas que os prendem.
- 9) Com todos os balões no ar, e com o *Bridle Point* fixo, é desfeita a ligação das pontas dos cabos auxiliares do primeiro balão secundário a contar do topo dos guinchos auxiliares uma vez que estes cabos ficam frouxos. Estas pontas são de seguida fixas, manualmente, no *Bridle Point*.
- 10) Com a rotação dos balões da plataforma imposta através dos motores, à medida que a plataforma sobe, os cabos principais são tracionados. Simultaneamente, o guincho do *Bridle Point* começa a desenrolar cabo de modo a tracionar o cabo principal que liga este ponto ao guincho principal. Deste modo é possível libertar e descolar o *Bridle Point* de forma suave.
- 11) Com o cabo auxiliar do *Bridle Point* frouxo, é desfeita a ligação entre este e o guincho que o controla. A ponta do cabo auxiliar do *Bridle Point* é fixa no cabo principal e a fase de descolagem termina.

### **Fase de aterragem**

- 1) Através do guincho principal, é iniciada a recolha do cabo principal. Na fase de aterragem, a velocidade angular dos balões secundários com rotação imposta é interrompida. O balão principal é o único que continua com rotação, porém com uma velocidade angular muito mais baixa.
- 2) De seguida, um operador liga o cabo auxiliar do *Bridle Point* (quando este chega a uma altura possível de alcançar) ao guincho auxiliar correspondente.
- 3) É iniciada a recolha do cabo auxiliar do *Bridle Point* permitindo assim uma aterragem deste ponto numa zona perto da *Sheave*. De salientar que o guincho auxiliar, que ajuda esta aterragem, está assente numa estrutura móvel de modo a ser colocado numa zona livre de obstáculos.
- 4) Após a aterragem do *Bridle Point*, o guincho principal desenrola cabo possibilitando deste modo que o guincho do *Bridle Point* possa ser deslocado para a zona de aterragem da plataforma.
- 5) Do *Bridle Point* são recolhidas as pontas dos cabos auxiliares do primeiro balão secundário a contar do topo sendo estas de seguida ligadas aos dois guinchos auxiliares correspondentes por parte de um operador.
- 6) É iniciada a recolha dos cabos auxiliares através do enrolamento dos cabos nos guinchos. Neste processo, os guinchos têm de estar colocados à frente do balão a ser puxado de modo a tracionar os cabos auxiliares no sentido contrário àquele que o guincho principal puxa o cabo principal. Nesta etapa o cabo principal está frouxo graças à ancoragem do *Bridle Point* ao solo.
- 7) Com o aproximar dos balões do solo, são colocados em posição os vários carrinhos de modo a aterrar os vários balões em cima destes.
- 8) Mal os balões cheguem a posições possíveis de alcançar, são amarrados com cintas colocadas à sua volta de forma manual por parte de operadores.
- 9) Com os balões secundários aterrados, é fixo num suporte nos pórticos junto ao solo as pontas dos cabos auxiliares extras de modo a segurar a estrutura e tornar frouxo os cabos auxiliares utilizados na aterragem dos balões secundários.
- 10) Com os cabos auxiliares frouxos, estes são removidos dos guinchos sendo de seguida acoplados a estes as pontas dos cabos auxiliares do balão principal, até então ligadas à parte superior do bumerangue do balão secundário mais próximo deste.
- 11) É iniciada a recolha dos cabos auxiliares por parte dos guinchos auxiliares forçando o balão principal a aproximar-se do solo, já depois de interrompida a rotação. Importante salientar que os balões secundários já aterrados anteriormente não foram desacoplados da plataforma.
- 12) Chegando perto do solo, o balão principal é amarrado e colocado nos carrinhos para ser também possível o seu transporte.
- 13) Todo o processo termina com a arrumação de todos os balões e componentes num local de armazenamento e segurança.

**Anexo A3 – Etapas dos processos de descolagem e aterragem da hipótese 3  
(Acoplamento e desacoplamento individual dos balões recorrendo a uma estrutura auxiliar)**

**Fase de descolagem**

- 1) Colocação, com o auxílio da estrutura auxiliar (ou carrinhos), do balão principal na posição conveniente para a descolagem. Nesta fase a plataforma constituída apenas pelo balão principal está ancorada pelo cabo principal e pelos dois cabos auxiliares todos eles frouxos. É garantido também inicialmente que o *Bridle Point* está pousado no solo com o auxílio de um outro guincho.
- 2) Os guinchos auxiliares começam a desenrolar os cabos auxiliares e o balão principal começa a ascender devido à força de impulsão criada pelo hélio. Já com o balão principal no ar, volta-se ao local onde os balões estão armazenados com a estrutura auxiliar (ou carrinhos) para ir buscar o próximo balão.
- 3) Antes dos cabos principais e auxiliares ficarem completamente tracionados, é acoplado a um suporte nos pórticos junto ao solo as pontas dos cabos auxiliares extras. Estes cabos são de seguida tracionados de modo a não deixar a plataforma subir.
- 4) Com a plataforma fixa, os cabos auxiliares do balão principal ficam frouxos e são desacoplados dos guinchos sendo de seguida fixos a estes os cabos auxiliares do novo balão secundário pronto a acoplar
- 5) Os cabos auxiliares anteriormente ligados aos guinchos são enrolados e tracionados tornando possível desfazer as ligações dos cabos auxiliares extras uma vez que ficam frouxos.
- 6) Com os cabos principais fixos pelos cabos auxiliares, o balão é finalmente acoplado à plataforma através das ligações das peças de ligação aos blocos e às partes inferiores dos bumeranges. Às manilhas dos bumeranges superiores são fixas as pontas dos cabos auxiliares do balão principal anteriormente desacopladas. Os cabos auxiliares extras são enrolados e fixos nas peças de ligação localizadas nas partes inferiores dos bumeranges.
- 7) As cintas são libertadas e é fornecido cabo auxiliar através do seu desenrolamento permitindo ao balão acabado de acoplar subir e descolar. Neste instante o *Bridle Point* está ancorado pelo cabo auxiliar e pelo cabo principal frouxo que permite a passagem de energia elétrica.
- 8) Caso se pretenda adicionar mais balões à plataforma são repetidos os passo 3, 4, 5, 6 e 7 passando os cabos auxiliares do novo balão a ocuparem a posição dos cabos auxiliares do balão anteriormente acoplado. Se for o caso, os balões secundários e principal podem ser postos em rotação para auxiliar o processo.
- 9) Acoplados todos os balões pretendidos, é desfeita a ligação das pontas dos cabos auxiliares do último balão dos guinchos auxiliares (este processo é possível devido à ancoragem do *Bridle Point* ao solo). Estas pontas são de seguida fixas, manualmente, no *Bridle Point*.

- 10) Com a rotação dos balões da plataforma imposta através dos motores, à medida que a plataforma sobe, os cabos principais são tracionados. Simultaneamente, o guincho do *Bridle Point* começa a desenrolar cabo de modo a tracionar o cabo principal que liga este ponto ao guincho principal. Deste modo é possível libertar e descolar o *Bridle Point* de forma suave.
- 11) Com o cabo auxiliar do *Bridle Point* frouxo, é desfeita a ligação entre o cabo e o guincho que o controla. A ponta do cabo auxiliar do *Bridle Point* é fixa ao cabo principal e a fase de descolagem termina.

### **Fase de aterragem**

- 1) Através do guincho principal, é iniciada a recolha do cabo principal. Na fase de aterragem, a velocidade angular dos balões secundários com rotação imposta é interrompida de modo a diminuir a força de sustentação criada pelo efeito de *Magnus*. O balão principal é o único que continua com rotação, porém com uma velocidade angular muito mais baixa.
- 2) De seguida, um operador liga o cabo auxiliar do *Bridle Point* (quando este chega a uma altura possível de alcançar) ao guincho auxiliar correspondente.
- 3) É iniciada a recolha do cabo auxiliar do *Bridle Point* permitindo assim uma aterragem deste ponto numa zona perto da *Sheave*. De salientar que o guincho auxiliar, que ajuda esta aterragem, está assente numa estrutura móvel de modo a ser colocado numa zona livre de obstáculos.
- 4) Após a aterragem do *Bridle Point*, o guincho principal desenrola cabo possibilitando deste modo que o guincho do *Bridle Point* possa ser deslocado para a zona de aterragem da plataforma.
- 5) De seguida, é feita a ligação dos cabos auxiliares do balão mais baixo da plataforma aos dois guinchos auxiliares por parte de um operador. Ao mesmo tempo, é colocada numa posição conveniente, a estrutura de auxílio à aterragem dos balões que permite receber e transportar os balões.
- 6) Inicia-se a recolha dos cabos auxiliares através do seu enrolamento nos guinchos. Nesta etapa o cabo principal desde do *Bridle Point* até ao primeiro balão está frouxo graças à ancoragem do *Bridle Point* ao solo.
- 7) Quando o balão e os seus cabos auxiliares ficam praticamente paralelos ao chão, o balão embate na estrutura e, com o auxílio de dois escadotes, dois operadores fazem passar em torno do balão duas cintas.
- 8) Com o balão constrangido pela estrutura e cintas, são desfeitas as ligações das pontas inferiores dos cabos auxiliares do balão acima com as manilhas nas partes superiores dos bumerangues do balão atual a ser desacoplado. Estas pontas são fixas num suporte nos pórticos. É também feita a ligação dos cabos auxiliares extras (fixos nas peças de ligação situadas nas partes inferiores dos bumerangues) a um outro suporte

nos pórticos junto ao solo de modo a segurar a plataforma e permitir a posterior troca de cabos auxiliares nos guinchos.

- 9) Caso se esteja a aterrar um balão secundário com rotação imposta, para evitar que os cabos de continuidade extra (cabos que garantem a continuidade dos cabos principais e que contornam os motores) sofram esticções, uma vez fixa a plataforma através dos cabos auxiliares extra, os guinchos auxiliares dão cabo de modo a tornarem os cabos auxiliares frouxos. De seguida são desfeitas as ligações das pontas dos cabos com as manilhas laterais das peças de ligação inferiores dos blocos. Estas pontas são de seguida fixas às manilhas laterais das peças de ligação superiores. Após a ligação, os guinchos auxiliares voltam a recolher os cabos auxiliares, tracionando-os, evitando deste modo esticções aquando do desacoplamento do balão da plataforma. Caso o balão a aterrar seja o principal ou um secundário sem rotação, esta etapa é ignorada.
- 10) De seguida, é desacoplado o balão da plataforma desfazendo as ligações com cavilhas e manilhas. As cavilhas e troços de mola beta são guardados pelos operadores podendo ser utilizados posteriormente para retirar o balão de cima da estrutura.
- 11) Solto da plataforma, o balão e toda a estrutura de aterragem são transportados para perto do local de armazenamento onde o balão é retirado e arrumado, fazendo com que a estrutura fique livre para receber um novo balão.
- 12) Ao mesmo tempo que se arruma o balão desacoplado, os guinchos auxiliares dão cabos permitindo assim o fecho e subida suave dos cabos principais da plataforma e a tração dos cabos auxiliares extras ligados anteriormente a um suporte no solo.
- 13) Com os cabos auxiliares extras tracionados, os cabos auxiliares ficam frouxos sendo possível retirá-los dos guinchos auxiliares. A plataforma neste momento está segura pelos cabos auxiliares extra.
- 14) Quando se pretender desacoplar o balão seguinte, são ligados aos guinchos as pontas inferiores dos cabos auxiliares, anteriormente desacopladas e guardadas, do balão a cima. Ao tracionar estes cabos, os cabos auxiliares extra ficam frouxos tornando possível desfazer de forma segura as ligações destes aos suportes no solo. As pontas dos cabos auxiliares extras são também guardadas pelos operadores.
- 15) Ao realizar a recolha dos cabos auxiliares, o balão baixa sendo repetidos os passos 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13. Estes processos são repetidos para o desacoplamento de todos os balões secundários que constituam a plataforma. Ao longo de toda a aterragem dos balões, os cabos principais vão sendo armazenados e guardados no chão.
- 16) Para aterrar o balão principal, depois de interrompida a rotação, inicia-se a recolha dos cabos auxiliares através do enrolamento nos guinchos. Caso se pretenda, a plataforma pode ser forçada a alinhar um dos topos ao vento, embatendo de seguida numa estrutura auxiliar de aterragem.
- 17) Independentemente da aterragem ser feita com um topo ou com a face lateral alinhada ao vento, todo o processo termina com a arrumação do último balão e todos os componentes num local de armazenamento e segurança.

## Anexo B

Neste anexo são apresentadas as tabelas referentes ao cálculo dos ângulos de equilíbrio, em função da velocidade do vento, para os dois tipos de balões com e sem rotação imposta.

**Tabela B1: Valor do ângulo de equilíbrio para os dois tipos de balões com rotação imposta em função da velocidade do vento (caso específico onde velocidade angular é 70 RPM para ambos os balões).**

Velocidade do vento [m/s]	Velocidade angular [RPM]	Balão principal				Balão secundário			
		$x$	$C_D$	$C_L$	$\alpha$ [°] <sup>1</sup>	$x$	$C_D$	$C_L$	$\alpha$ [°] <sup>1</sup>
4	70	3,48	2,2	7,4	74,73	2,29	1,7	5,8	74,41
5		2,79	1,8	6	74,34	1,83	1,4	3,5	69,21
6		2,32	1,7	5,6	73,91	1,53	1,3	3	67,45
7		1,99	1,4	4	71,63	1,31	1,2	2,7	66,77
8		1,74	1,3	3,2	68,87	1,15	1,2	2,5	65
10		1,39	1,2	2,9	68,23	0,92	1,2	2,2	61,89
12		1,16	1,2	2,4	64,12	0,76	1,2	2	59,44
14		0,99	1,2	2,3	62,99	0,65	1,2	1,9	59,05
16		0,97	1,2	2,2	61,83	0,57	1,2	1,8	56,58
18		0,77	1,2	2	59,44	0,51	1,2	1,7	55,01
$\Sigma$					680,08	$\Sigma$ 634,81			

Média da diferença entre o ângulo de equilíbrio do balão principal e balão secundário:

$$\bar{x} = \frac{680,08 - 634,81}{10} = 4,527^\circ$$

Com  $x$  sendo a razão de velocidades,  $C_D$  o coeficiente de arrasto,  $C_L$  o coeficiente de sustentação e  $\alpha$  o ângulo de equilíbrio com a horizontal.

<sup>1</sup> Ângulo de equilíbrio é calculado tendo por base os valores da força de arrasto e sustentação para cada uma das velocidades do vento (e respetivo  $C_D$  e  $C_L$ ), a força de impulsão resultante e o peso de cada um dos dois tipos de balão.

**Tabela B2: Valor do ângulo de equilíbrio para os dois tipos de balões sem rotação imposta em função da velocidade do vento.**

Velocidade do vento [m/s]	Coeficiente de arrasto, $C_D$	Ângulo de equilíbrio, $\alpha$ [°] <sup>2</sup>	
		Balão principal	Balão secundário
4	0,8	39,46	20,12
5		27,78	13,19
6		20,10	9,25
7		15,05	6,82
8		11,63	5,23
10		7,50	3,35
12		5,23	2,33
14		3,84	1,71
16		2,95	1,31
18		2,33	1,04

<sup>2</sup> Ângulo de equilíbrio é calculado tendo por base os valores da força de arrasto para cada uma das velocidades do vento, a força de impulsão resultante e o peso de cada um dos dois tipos de balão.

## Anexo C

Neste anexo é apresentado o raciocínio levado no cálculo do rácio força resultante/massa e realizada a primeira abordagem à análise das várias configurações de modo a entender as vantagens de acoplar balões secundários à plataforma.

Com a adição e acoplamento de balões secundários ao sistema atual da empresa, a *Omnidea* tem como principal objetivo aumentar o valor da força aerodinâmica resultante, permitindo assim que o sistema seja capaz de atingir altitudes mais elevadas e carregar uma maior carga útil (*payload*). Com isto é também garantido que o conjunto é modular uma vez que é permitido adicionar ou retirar balões conforme os objetivos pretendidos. Todavia, com o acoplamento de um número crescente de balões à plataforma, a massa total do sistema aumenta também.

Deste modo, é importante estudar as várias configurações do sistema e compará-las com o conjunto atual constituído por apenas o balão principal. Esta comparação clarificará quais os tipos de balões que devem ser utilizados para obter os melhores resultados (quando comparado com o sistema atual).

Para realizar esta abordagem inicial é interessante definir um rácio de força resultante/massa que relacione a força total que o sistema realiza com a sua massa. Quanto maior for o valor do rácio do correspondente sistema, mais interessante este é para a empresa, uma vez que garante uma maior força resultante por unidade de massa.

Para obter os valores da força aerodinâmica resultante, foi definido o cenário de velocidade do vento máxima (18 m/s) e velocidade angular do balão principal e balão secundário com rotação igual a 70 RPM. No que toca às massas de cada balão, foi definido que independentemente de ter rotação imposta ou não, todos os balões secundários têm um peso de 70,48 kgf. Já para o balão principal, é considerado que este tem de massa 150 kg. Na Tabela C1 são resumidos os valores da massa e da força aerodinâmica resultante (calculada tendo já em consideração os valores do peso e impulsão resultante) para cada tipo de balão.

**Tabela C1: Valores da massa, impulsão e da força aerodinâmica resultante para cada tipo de balão do sistema ( $U_{\infty}=18$  m/s,  $\omega=70$  RPM).**

	Massa [kg]	Impulsão [kgf]	Força aerodinâmica resultante [N]
<b>Balão Principal</b>	150	190	28176,25
<b>Balão Secundário com rotação imposta</b>	70,48	82,19	16527,71
<b>Balão Secundário sem rotação imposta</b>			6350,41



Assumindo que a plataforma pode ser composta por, no máximo, quatro balões (apenas um principal) e que o balão principal tem sempre rotação imposta, há um total de nove configurações distintas a estudar. Fazendo a massa total e força aerodinâmica resultante total iguais à soma dos respectivos valores individuais de cada balão que constitui o sistema e sabendo que o rácio é igual ao quociente entre a força aerodinâmica resultante total e a massa total, é possível construir a Tabela C2 onde são apresentados os valores dos rácios para as nove configurações de sistema distintas.

***Tabela C2: Valores da massa total, força aerodinâmica resultante total e rácio para cada uma das nove possíveis configurações do sistema.***

Sistema	Massa total [kg]	Força aerodinâmica resultante total [N]	Rácio
<b>Balão Principal (sistema atual)</b>	<b>150</b>	<b>28176,25</b>	<b>187,84</b>
<b>Balão Principal + 1 Balão Secundário com rotação</b>	220,48	44703,97	202,76
<b>Balão Principal + 1 Balão Secundário sem rotação</b>		34526,66	156,60
<b>Balão Principal + 2 Balões Secundários com rotação</b>	290,96	61231,68	210,45
<b>Balão Principal + 1 Balão Secundário com rotação e 1 sem rotação</b>		51054,38	175,47
<b>Balão Principal + 2 Balões Secundários sem rotação</b>		40877,07	140,49
<b>Balão Principal + 3 Balões Secundários com rotação</b>		77759,39	215,14
<b>Balão Principal + 2 Balões Secundários com rotação e 1 sem rotação</b>	361,44	67582,09	186,98
<b>Balão Principal + 1 Balão Secundário com rotação e 2 sem rotação</b>		57404,79	158,82
<b>Balão Principal + 3 Balões Secundários sem rotação</b>		47227,49	130,66

Analisando os valores dos rácios obtidos verifica-se que apenas três dos nove cenários possíveis promovem um rácio superior ao do sistema atual da empresa (187,84). Analisando e correspondendo a cada um destes três casos o respetivo sistema, conclui-se que o

acoplamento de balões secundários à plataforma apenas é vantajoso se estes tiverem todos eles rotação imposta. Todavia, no cenário onde são acoplados três balões secundários com rotação imposta, a força aerodinâmica resultante da plataforma toma o valor de 77759,39 N, valor superior a 74556 N, valor este que o par de cabos, desde do balão mais baixo até ao *Bridle Point*, não é capaz de suportar. Conclui-se assim que a rotação imposta aos balões secundários para a velocidade máxima de vento deve ser reduzida (tal como referido no subcapítulo 6.4.1) de modo a evitar ruturas nos cabos principais.

No cenário oposto, onde os balões secundários não têm rotação, caso sejam adicionados um, dois ou três balões, o rácio vai cada vez sendo menor, permitindo assim concluir que o acoplamento de balões secundários sem rotação é bastante desvantajoso uma vez que a contribuição para a força aerodinâmica resultante total do sistema é anulada pela massa que estes acrescentam, resultando numa menor quantidade de força total por unidade de massa.

Quando o sistema é composto por balões secundários com e sem rotação, os valores dos rácios melhoram e são superior quando comparados com os dos sistemas compostos apenas por balões secundários sem rotação. Por outro lado, os resultados obtidos são ainda, inferiores aos dos sistemas compostos apenas por balões secundários com rotação. Das configurações mistas, o melhor cenário é o de uma plataforma composta pelo balão principal e três balões secundários com dois deles com rotação imposta, onde o rácio se aproxima bastante do valor do sistema atual (186,98), sendo porém ainda inferior. Conclui-se deste modo que, com os valores definidos para levar a cabo o estudo, apenas é vantajoso alterar o sistema atual caso seja para adicionar apenas balões secundários com rotação imposta à semelhança do balão principal. A adição de balões secundário sem rotação apenas será conveniente caso haja, sobretudo, uma otimização dos pesos do balão ou dos componentes laterais.

Importante salientar que esta é apenas uma breve e inicial análise das vantagens e desvantagens entre uma plataforma constituída por diversos balões e apenas por um balão. Assim sendo, é recomendado que em trabalhos futuros seja realizado um estudo muito mais aprofundado e detalhado acerca deste tema de modo a entender as vantagens (caso existam) para a empresa da utilização de um sistema compostos por diversos balões (com e sem rotação) ao invés de uma plataforma constituída apenas por um aeróstato como atualmente.

## Anexo D

Neste anexo é apresentado o fluxograma que resume o projeto do bumerangue.

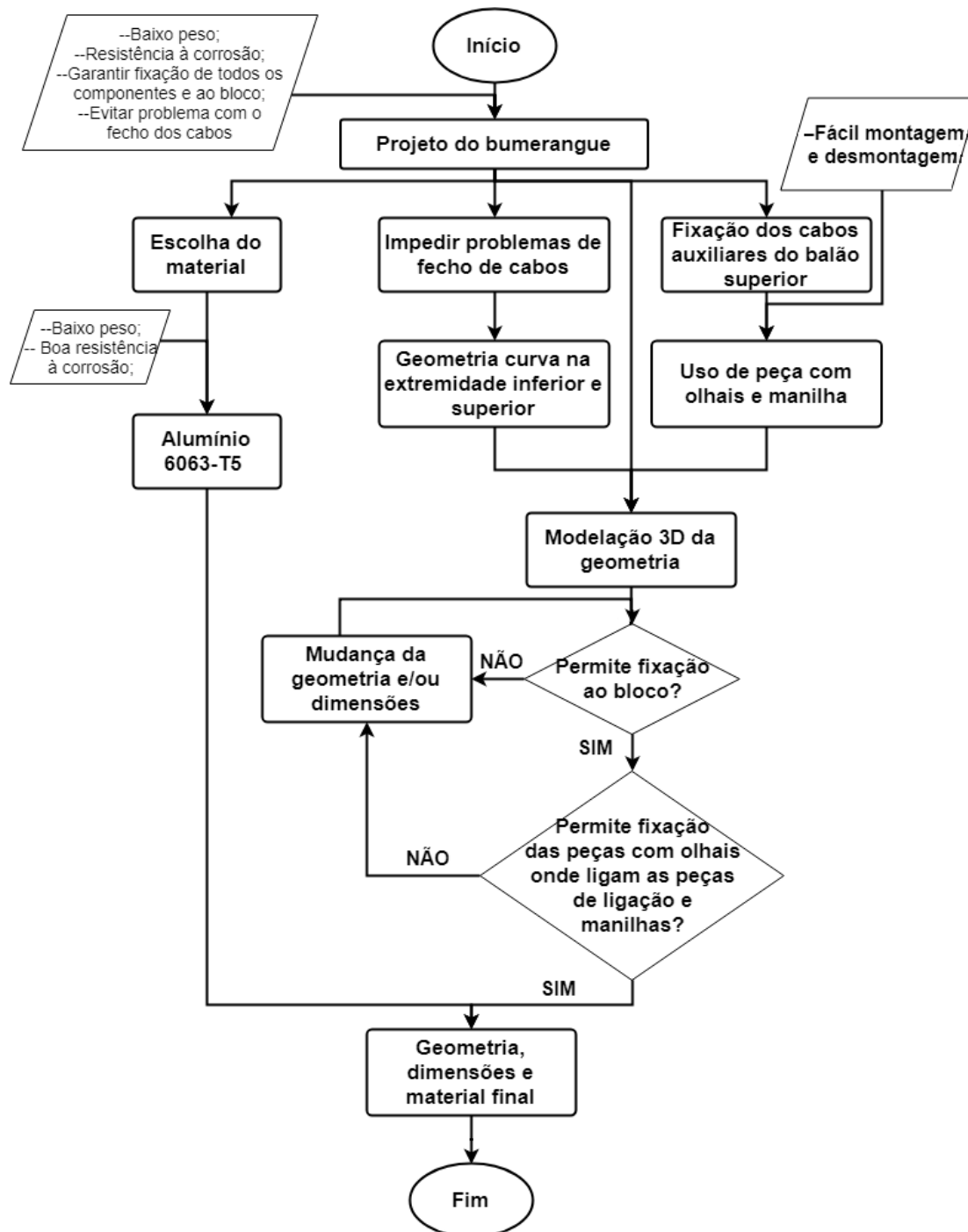


Figura D1: Fluxograma do projeto do bumerangue

## Anexo E

Neste anexo é apresentado o fluxograma que resume o projeto da peça de ligação dos cabos auxiliares e principais e da peça de ligação do *cabre grip*.

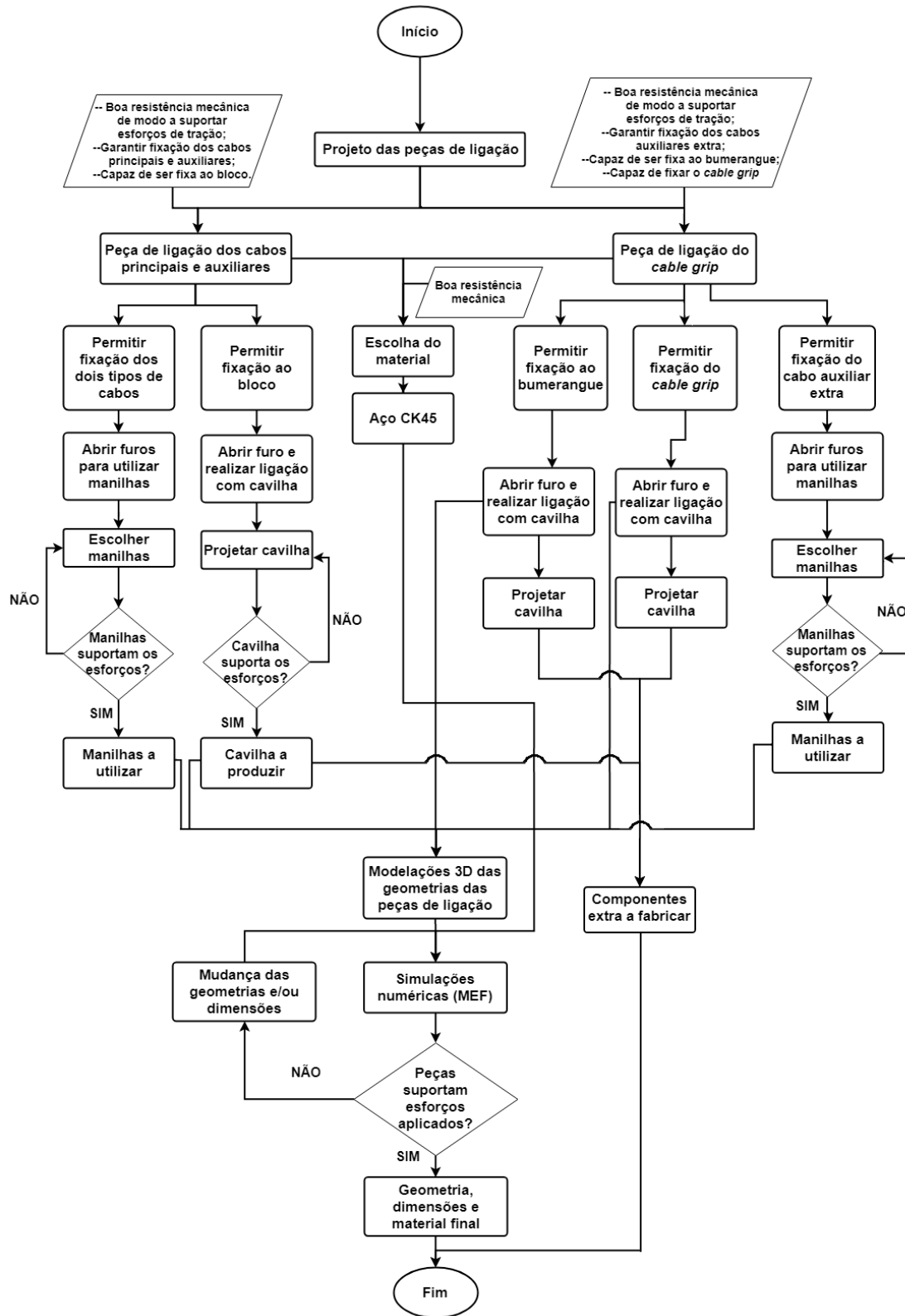
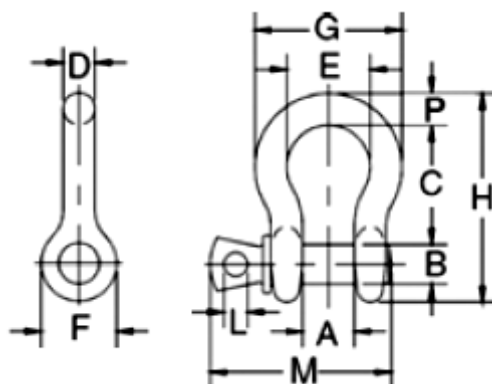


Figura E1: Fluxograma do projeto das peças de ligação.

## Anexo F

Neste anexo são sumariadas as dimensões das manilhas (do fabricante *Crosby*) utilizadas nos sistemas de acoplamento dos balões aos cabos principais/plataforma.



**Figura F1:** Esquema das dimensões das manilhas do fabricante Crosby (semelhante aos dois modelos) (adaptado de [27]).

**Tabela F1:** Dimensões da manilha utilizadas do modelo G-209 do fabricante Crosby (adaptado de [27]).

G-209 Manilhas curvas com pino roscado															
Dimensão nominal (pol.)	Carga Limite de Trabalho (t)	Peso Cada (kg)	Dimensões (mm)											Tolerância + / -	
			A	B	C	D	E	F	G	H	L	M	P	C	A
5/16	3/4	.09	13.5	9.65	31.0	7.85	21.3	19.1	37.3	53.0	5.60	42.2	7.85	1.50	1.50

**Tabela F2:** Dimensões da manilha utilizadas do modelo G-209A do fabricante Crosby (adaptado de [27]).

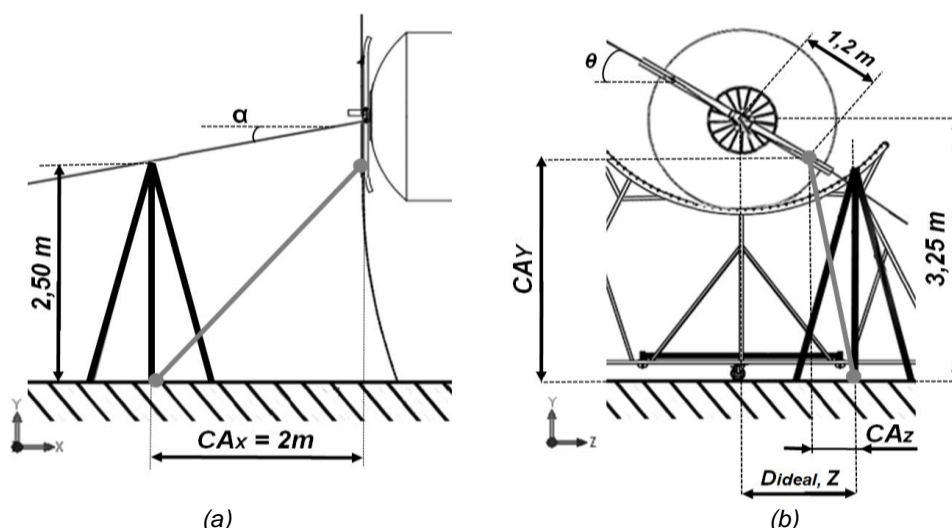
G-209A Manilhas com pino roscado de Alloy Crosby®															
Dimensão nominal (pol.)	Carga Limite de Trabalho (t)	Peso Cada (kg)	Dimensões (mm)											Tolerância + / -	
			A	B	C	D	E	F	G	H	L	M	P	C	A
3/8	2	.14	16.8	11.2	36.6	9.65	26.2	23.1	45.2	63.5	6.35	51.5	9.65	3.30	1.50
7/16	2-2/3	.17	19.1	12.7	42.9	11.2	29.5	26.9	51.5	74.0	7.85	60.5	11.2	3.30	1.50
1/2	3-1/3	.29	20.6	16.0	47.8	12.7	23.3	30.2	58.5	83.5	9.65	68.5	12.7	3.30	1.50
5/8	5	.63	26.9	19.1	60.5	16.0	42.9	38.1	74.5	106	11.2	85.0	17.5	3.30	1.50

## Anexo G

Neste anexo é apresentado o raciocínio levado no cálculo do comprimento do cabo auxiliar extra.

Os cabos auxiliares extras têm como função fixar a plataforma aérea não permitindo que esta suba quando é desacoplado um balão secundário, permitindo deste modo a troca de cabos auxiliares nos respectivos guinchos auxiliares. Os cabos auxiliares extras são enrolados e ligados na parte inferior dos bumeranges dos balões secundários (balão principal não necessita de cabos auxiliares extra) estando solidários com os cabos principal através de *cable grips*. Uma vez com os balões a aterrar, as pontas soltas dos cabos auxiliares extra são fixas num suporte nos pórticos junto ao solo. Para assegurar que a plataforma não sobe em demasia quando os cabos auxiliares extra são tracionados, é importante calcular o comprimento ideal e mínimo necessário para estes cabos. O procedimento para o cálculo deste comprimento é semelhante ao já utilizado em certos subcapítulos desta dissertação, como por exemplo, no cálculo do comprimento de cabo auxiliar que ainda não foi recolhido aquando da aterragem dos balões com recurso à estrutura auxiliar.

O comprimento dos cabos auxiliares extra,  $CA$ , é então a resultante das três componentes do comprimento na direção de cada um dos eixos ( $CA_x$ ,  $CA_y$  e  $CA_z$ ) tal como é apresentado na Figura G1. Sabendo as distâncias na direção de cada um dos eixos, o comprimento dos cabos auxiliares extra pode ser calculado através da norma.



**Figura G1: Componentes, na direção de cada um dos eixos, do comprimento do cabo auxiliar extra; (a) Vista de frente; (b) Vista lateral.**

Graças às considerações tomadas ao longo da dissertação, a componente  $CA_x$  é sempre constante e igual a 2 metros, distância esta que vai desde do centro dos pórticos até ao ponto por onde os balões são recolhidos.

Para calcular as componentes  $CA_y$  e  $CA_z$  é necessário ter em consideração que a distância desde do centro dos balões secundários até ao ponto onde os cabos auxiliares extra estão fixos é sensivelmente 1,2 metros. Com o conhecimento deste valor, sabendo o ângulo de

equilíbrio que os balões e cabos fazem com a horizontal,  $\beta$ , e a distância ideal representada por  $z$  (no subcapítulo 7.4), é possível chegar aos valores de  $CA_Y$  e  $CA_Z$ . As componentes em  $Y$  e  $Z$  são dadas então, respetivamente, por:

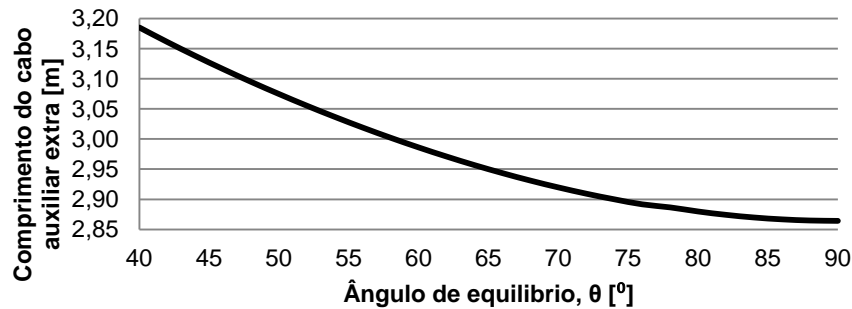
$$CA_Y = (H_{est.} + r) - (1,2 \times \sin \theta) \quad (G.1)$$

$$CA_Z = \left( \frac{(H_{est.} + r) - H_{port.}}{\tan \theta} \right) - (1,2 \times \cos \theta) \quad (G.2)$$

Com  $H_{est.}$  sendo a altura desde do solo até ao ponto mais baixo da base em berço da estrutura,  $r$  o raio do balão a aterrar,  $H_{port.}$  a altura do pórtico e  $\theta$  o ângulo de equilíbrio que os cabos auxiliares e balões fazem com a horizontal.

Tendo em conta que os cabos auxiliares extra apenas são utilizados nos balões secundários, os valores dos ângulos de equilíbrio  $\theta$  convenientes de estudo são  $44,22^\circ$ ,  $49,54^\circ$  e  $56,19^\circ$  (considerando o caso da aterragem de uma plataforma constituída por quatro balões, com velocidade de vento igual 7 m/s e sendo o balão principal o único com velocidade angular e igual a 35 RPM).

Considerando então ângulos de equilíbrio entre 40 e 90 graus, substituindo os valores na equação (G.1) e (G.2) e sabendo que  $CA_X$  é sempre constante e igual a 2 metros, através da norma é obtido o comprimento do cabo auxiliar extra podendo deste modo construir o gráfico da Figura G2 que relaciona o comprimento mínimo dos cabos auxiliares extras com o valor do ângulo de equilíbrio com a horizontal.







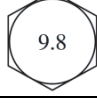


**Figura G2: Comprimento mínimo necessário dos cabos auxiliares extra conforme o valor do ângulo de equilíbrio.**

Analisando a Figura G2, conclui-se que à medida que o valor do ângulo de equilíbrio aumenta, o comprimento do cabo auxiliar extra necessário é menor (devido ao facto dos balões aterramem numa posição mais vertical). Como ficou definido que os processos de aterragem são levados no máximo com velocidades de vento de 7 m/s, o ângulo de equilíbrio menor será sempre  $44,22^\circ$ . Assim sendo, definiu-se que o comprimento final do cabo auxiliar extra é igual a 3,2 metros, garantindo assim o mínimo necessário em todos os cenários de aterragem e que não existe uma subida exagerada da plataforma uma vez que o valor escolhido está bastante perto do mínimo requerido (3,13 metros).

## Anexo H

Neste anexo é apresentada a tabela das propriedades mecânicas para parafusos, porcas e pernos de classe métrica em função da classe de resistência e a tabela que relaciona a área resistente de parafusos métricos em função do seu diâmetro e passo.

**Tabela H1: Tabela das propriedades mecânicas para parafusos, porcas e pernos de classe métrica em função da classe de resistência (adaptado de [32]).**

Classe de Resistência	Gama de dimensões (inclusive)	Tensão de prova [MPa]	Tensão de rotura [MPa]	Tensão de cedência [MPa]	Material	Marcação na cabeça
4.6	M5 – M36	225	400	240	Aço – Baixo teor de carbono	
4.8	M1.6 – M16	310	420	340	Aço – Baixo teor de carbono	
5.8	M5 – M24	380	520	420	Aço – Baixo teor de carbono	
8.8	M16 – M36	600	830	660	Aço – Médio teor de carbono TT <sup>1</sup>	
9.8	M1.6 – M16	650	900	720	Aço – Médio teor de carbono TT <sup>1</sup>	
10.9	M5 – M36	830	1040	940	Aço – Liga de baixo teor de carbono TT <sup>1</sup>	
12.9	M1.6 – M36	970	1220	1100	Aço – Liga TT <sup>1</sup>	

<sup>1</sup>TT – Tratado termicamente.

Para as classes 4.6 a 5.8 é considerado uma tensão admissível igual a 70% da tensão de prova;

Para as classes 8.8 e superiores considera-se uma tensão admissível de 70% da tensão de cedência.



**Tabela H2: Tabela que relaciona a área resistente de parafusos métricos em função do seu diâmetro e passo (adaptado de [32]).**

Diâmetro nominal [mm]	Passo grosso			Passo fino		
	Passo [mm]	Área de secção resistente [mm <sup>2</sup> ]	Área do menor diâmetro [mm <sup>2</sup> ]	Passo [mm]	Área de secção resistente [mm <sup>2</sup> ]	Área do menor diâmetro [mm <sup>2</sup> ]
1,6	0,35	1,27	1,07			
2	0,40	2,07	1,79			
2,5	0,45	3,39	2,98			
3	0,5	5,03	4,47			
3,5	0,6	6,78	6,00			
4	0,7	8,78	7,75			
5	0,8	14,2	12,7			
6	1	20,1	17,9			
8	1,25	36,6	32,8	1	39,2	36,0
10	1,5	58,0	52,3	1,25	61,2	56,3
12	1,75	84,3	76,3	1,25	92,1	86,0
14	2	115	104	1,5	125	116
16	2	157	144	1,5	167	157
20	2,5	245	225	1,5	272	259
24	3	353	324	2	384	365
30	3,5	561	519	2	621	596
36	4	817	759	2	915	884
42	4,5	1120	1050	2	1260	1230
48	5	1470	1380	2	1670	1630
56	5,5	2030	1910	2	2300	2250
64	6	2680	2520	2	3030	2980
72	6	3460	3280	2	3860	3800
80	6	4340	4140	1,5	4850	4800
90	6	5590	5360	2	6100	6020
100	6	6990	6740	2	7560	7470
110				2	9180	9080

## Anexo I

Neste anexo é apresentado o fluxograma que resume o projeto da estrutura auxiliar dos processos de aterragem e descolagem.

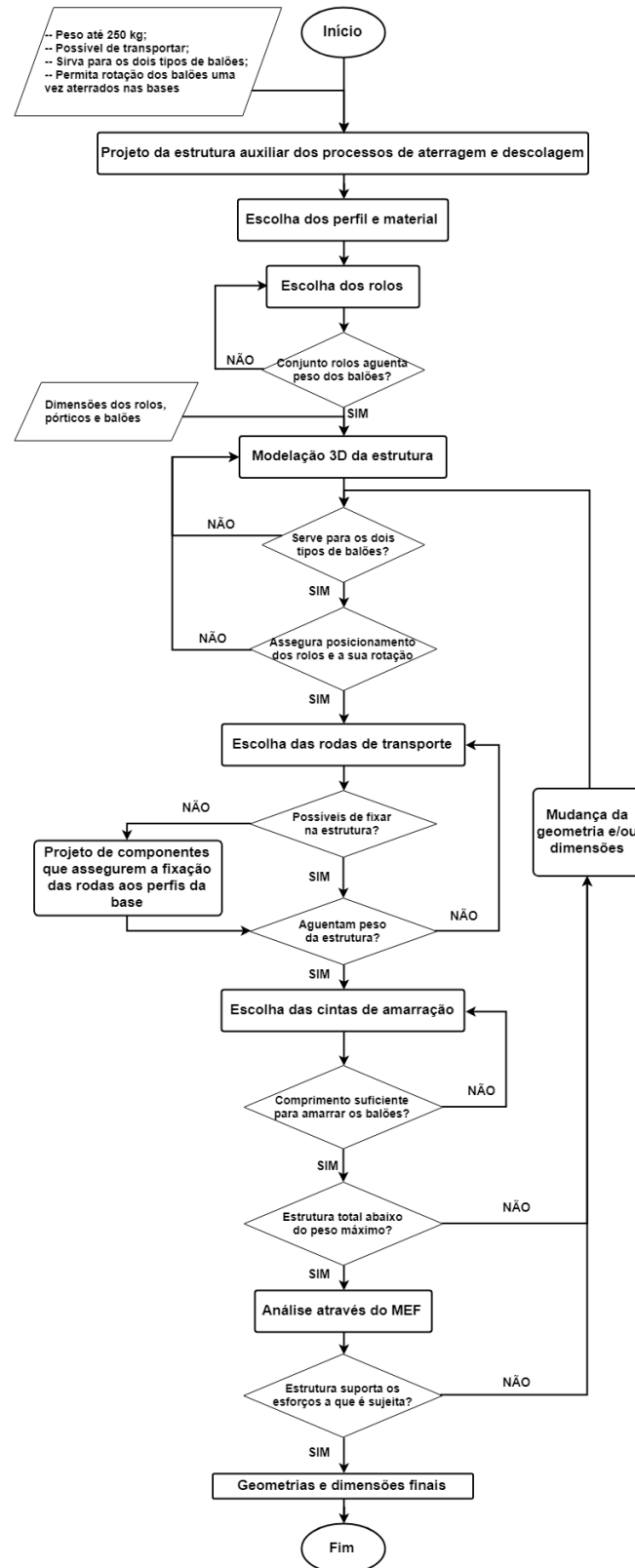


Figura I1: Fluxograma do projeto das estrutura auxiliar.

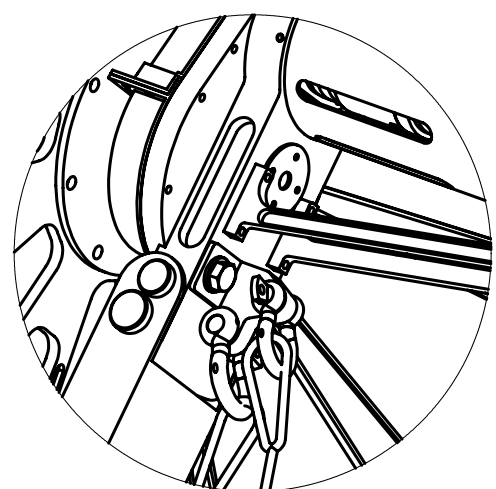
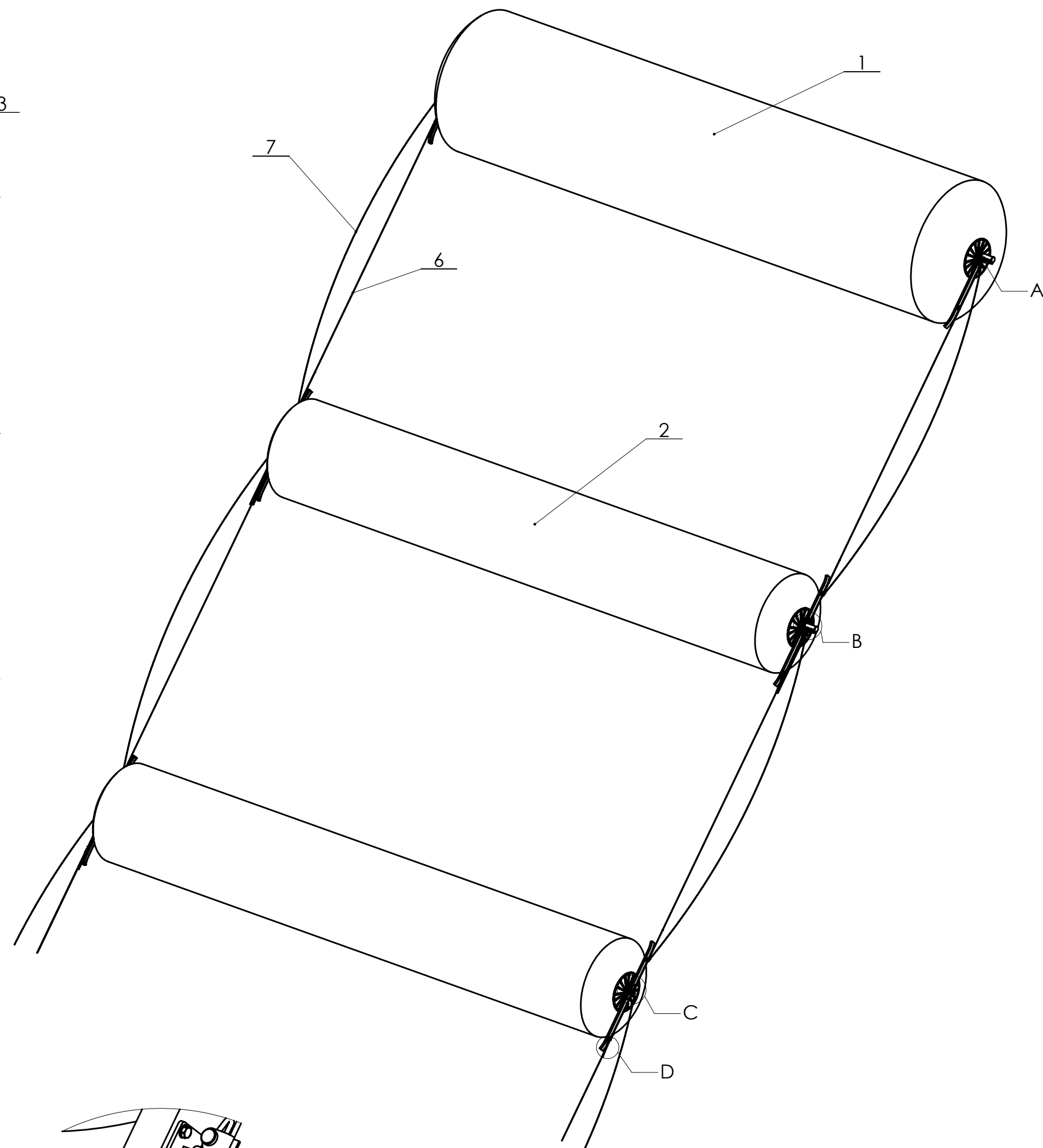
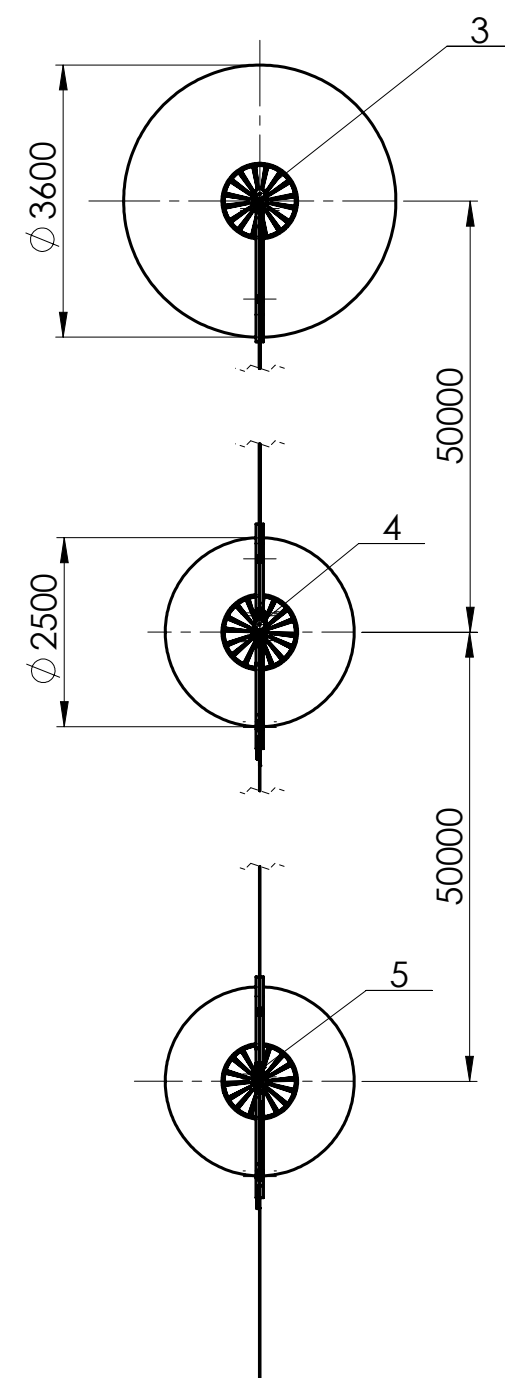
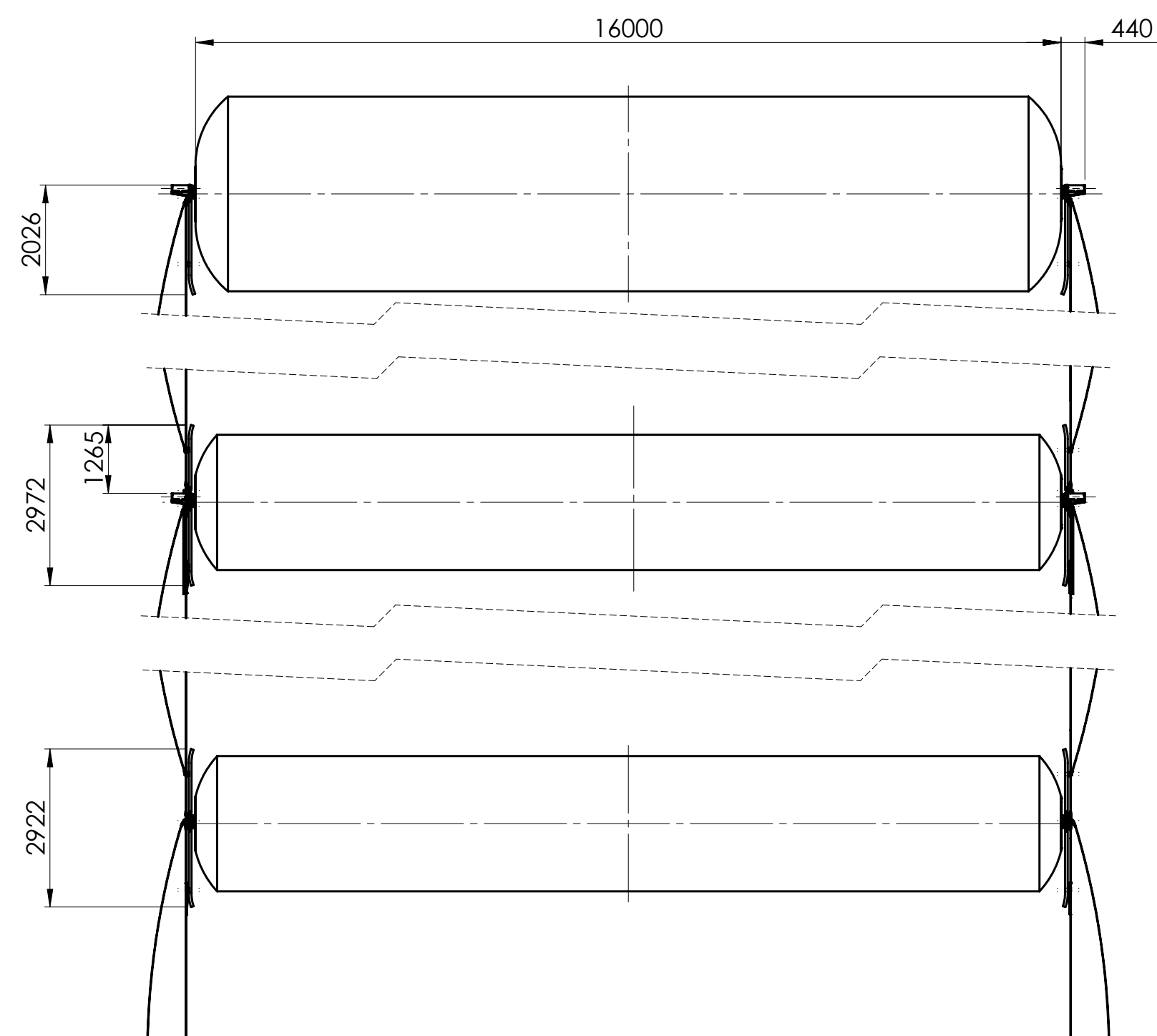
## Anexo J

Neste anexo são agrupados os desenhos técnicos referentes ao sistema de ligação e acoplamento dos balões aos cabos principais e plataforma.

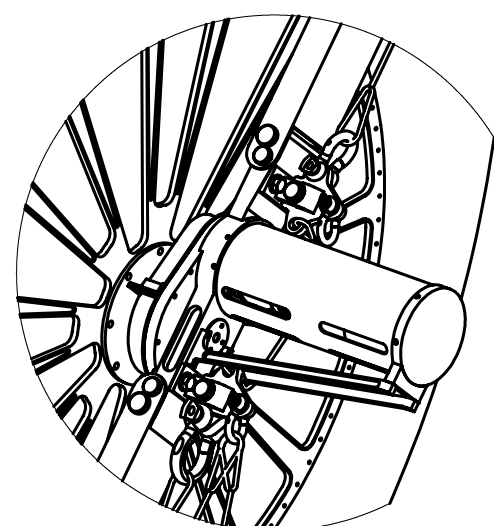
Os desenhos realizados são os seguintes:

**Tabela J1: Desenhos técnicos referentes ao sistema de ligação e acoplamento dos balões aos cabos principais e plataforma**

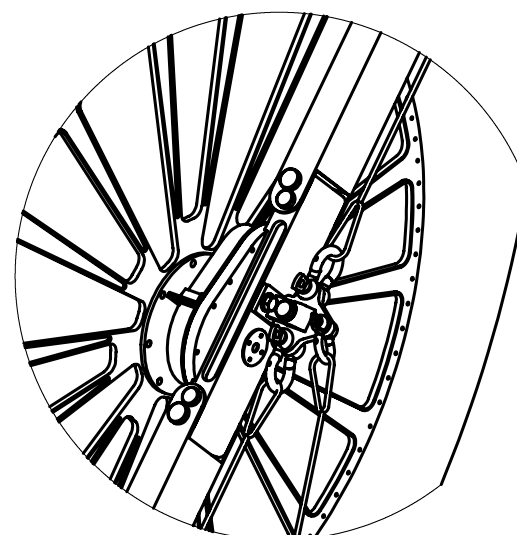
Sistema/Componente	Designação do desenho
Conjunto Plataforma	Plataforma-00
Sistema acoplamento balão principal	BP-00
Sistema acoplamento balão secundário com rotação	BScR-00
Sistema acoplamento balão secundário sem rotação	BSsR-00
Bloco balão principal	BP-01
Suporte motor	BP-02
Apoio esquerdo do motor	BP-03
Apoio direito do motor	BP-04
Bumerangue balão principal	BP-05
Pino articulação bumerangue 1	BP-06
Pino articulação bumerangue 2	BP-07
Peça de ligação bloco-Balão principal	BP-08
Peça com um olhal	BP-09
Bloco balão secundário com rotação	BScR-01
Tubo exterior do motor do Balão secundário	BScR-02
Bumerangue inferior do balão secundário	BScR-03
Bumerangue superior do balão secundário	BScR-04
Peça com dois olhais	BScR-05
Peça com dois olhais inclinada	BScR-06
Peça de ligação	BScR-07
Peça de ligação caso extremo	BScR-08
Cavilha	BScR-09
Peça com dois olhais para <i>cabie grip</i>	BScR-10
Peça de ligação <i>cabie grip</i>	BScR-11
Cavilha fixação <i>cabie grip</i>	BScR-12
Bloco balão secundário sem rotação	BSsR-01



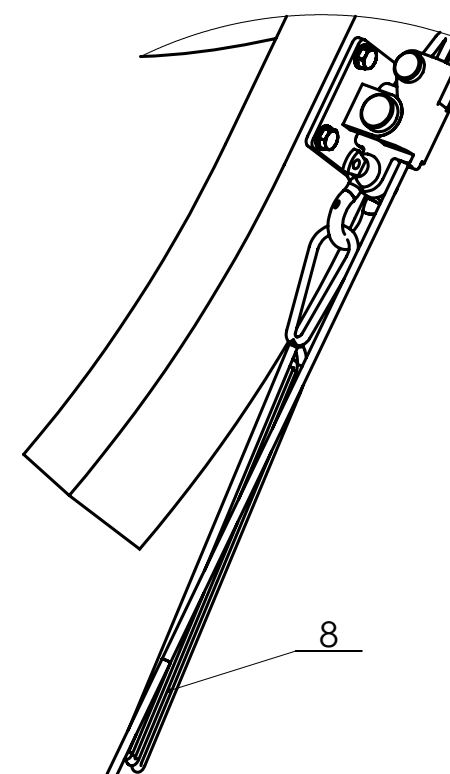
Pormenor A  
Escala 1 : 5



Pormenor B  
Escala 1 : 10



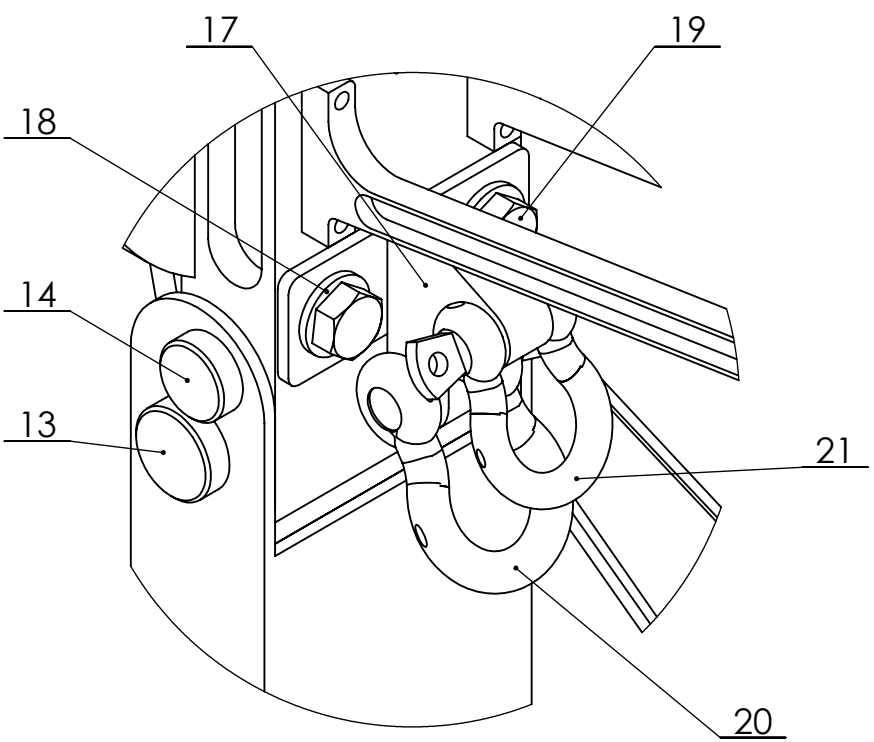
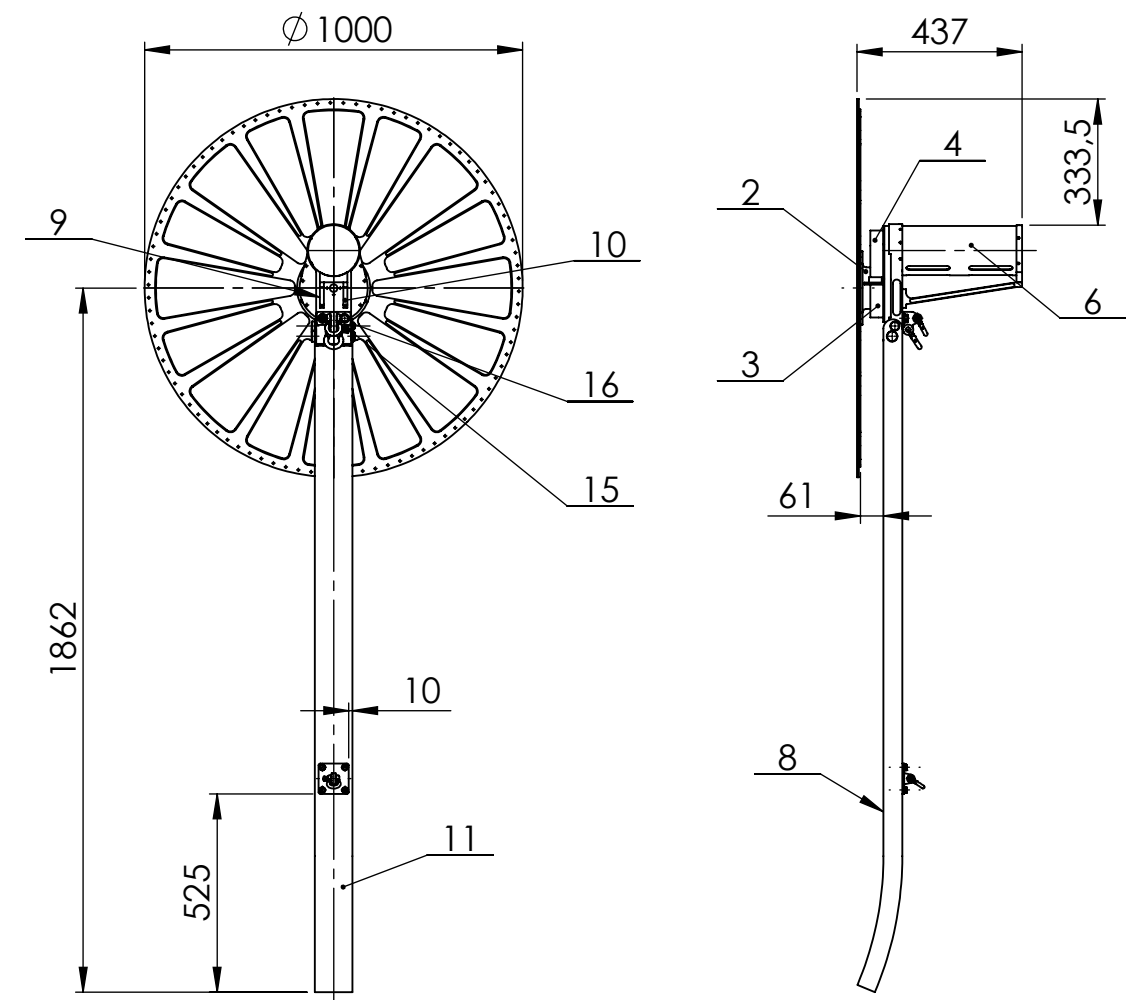
Pormenor C  
Escala 1 : 10



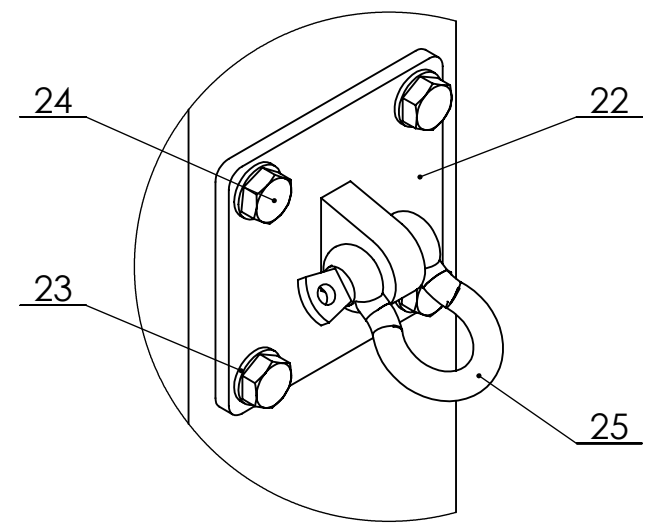
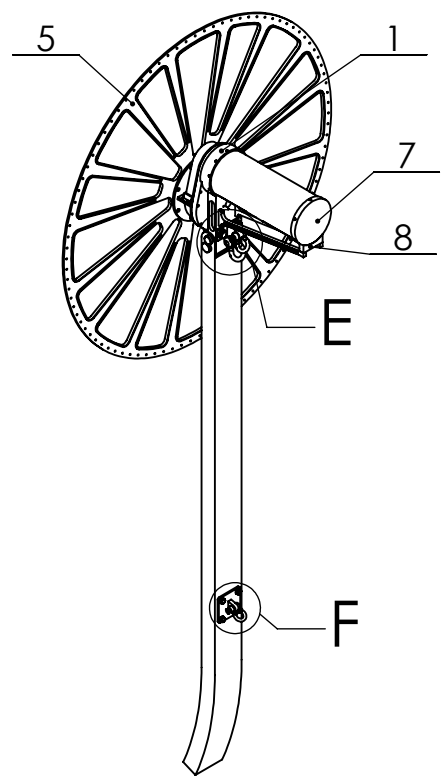
Pormenor D  
Escala 1 : 5

4	Cabo auxiliar extra		Dyneema	8				
6	Cabo auxiliar		Dyneema	7				
3	Cabo principal		Dyneema	6				
2	Sistema acoplamento balão secundário sem rotação	BSsR-00		5				
2	Sistema acoplamento balão secundário com rotação	BSsR-00		4				
2	Sistema acoplamento balão principal	BP-00		3				
2	Balão Secundário			2				
1	Balão Principal			1				
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DO DESENHO	MATERIAL	Nº REF.	PRODUTO SEMI ACABADO Nº MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	Observações	

<i>Distância entre balões na vista em perspectiva não está à escala</i>	Proj.	2-7-18	Gonçalo Vieira	<i>Dissertação em Engenharia Mecânica</i>	<i>FCT-UNL Omnidea</i>		
	Des.	2-7-18	Gonçalo Vieira				
	Copiou						
	Visto						
	Escala	<i>Plataforma aérea ancorada constituída por três balões</i>			<i>Plataforma-00</i>		
1:100							
Toleran.							
	NP-265						
	Médio						



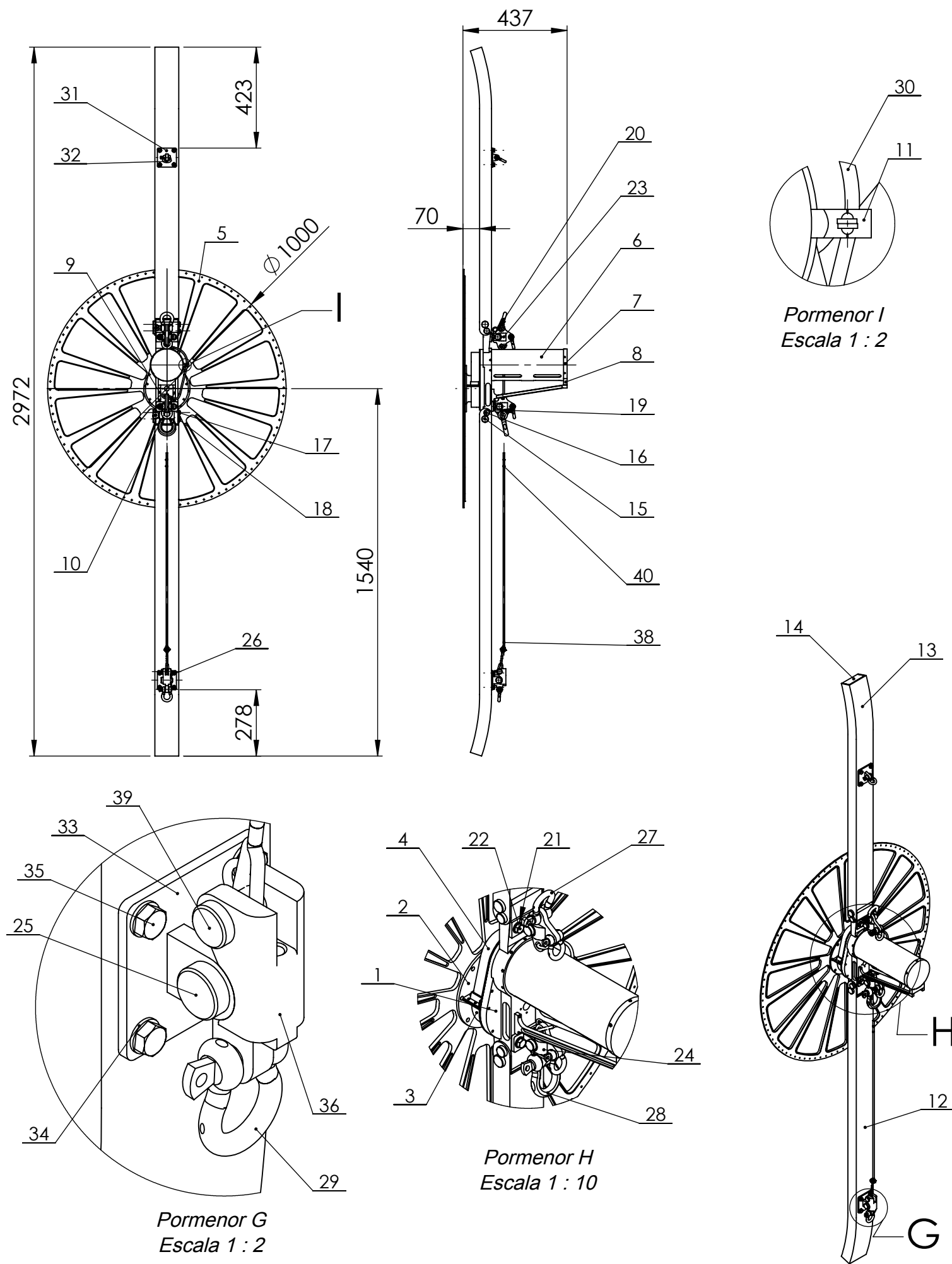
Pormenor E  
Escala 1:2



Pormenor F  
Escala 1 : 2

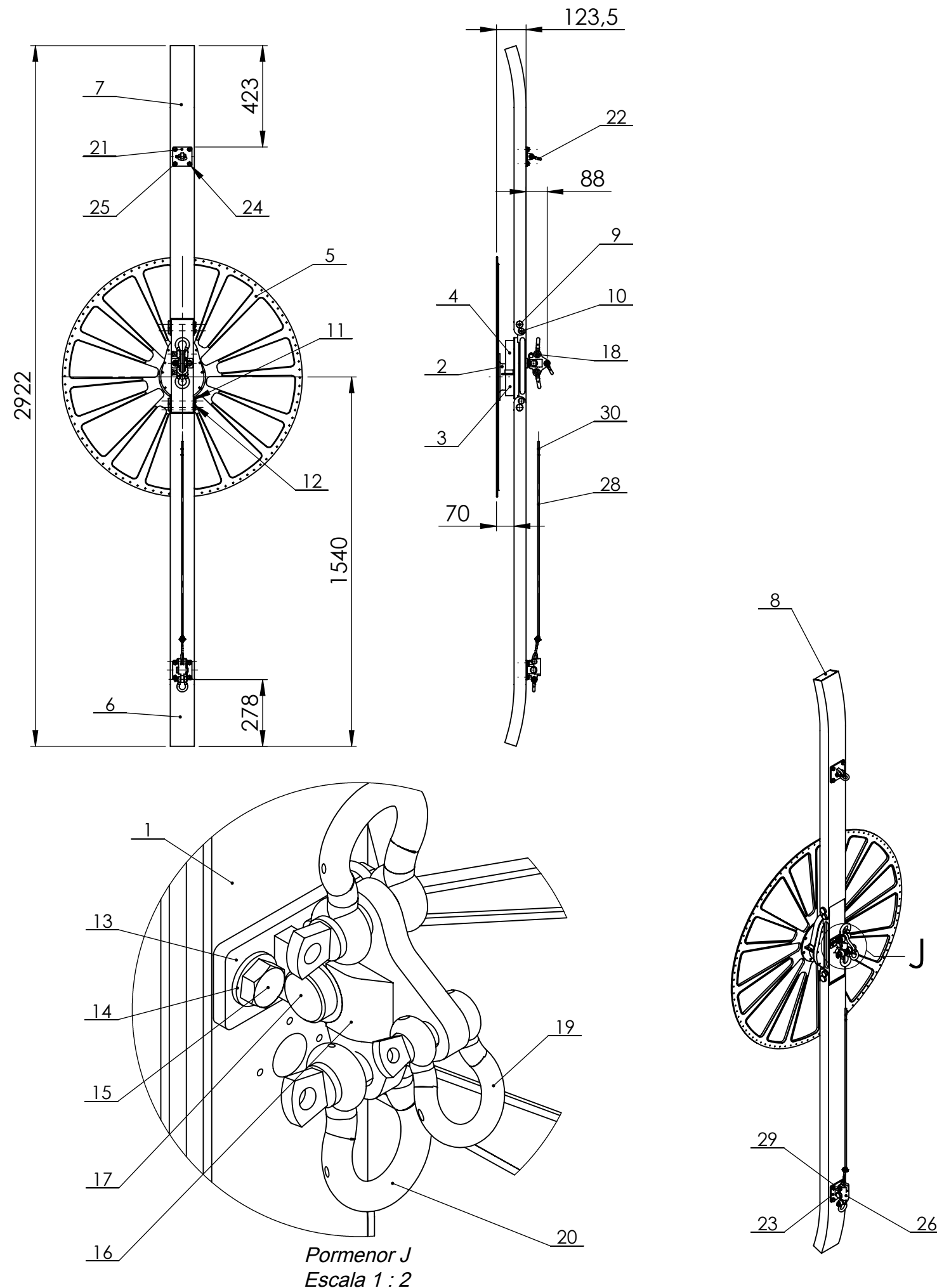
1	Manilha crosby G-209 5/16	Ref: 1018393	Aço CK45	25			
4	Parafuso cabeça sextavada M8 x 30	EN ISO 4017	Aço CK45	24			
4	Anilha de chapa M8	ISO 7089		23			
1	Peça com um olhal	BP-09	Aço CK45	22		0.29	
1	Manilha Crosby G-209A 3/8	Ref: 1017450		21			
1	Manilha Crosby G-209A 7-16	Ref: 1017472		20			
2	Parafuso cabeça sextavada M12 x 30	EN ISO 4017		19			
2	Anilha de chapa M12	ISO 7089		18			
1	Peça de ligação bloco/BP	BP-08	Aço CK45	17		0.29	
1	Freio exterior - 14 x 1	DIN 471		16			
1	Freio exterior - 20 x 1.2	DIN 471		15			
1	Pino articulação bumerangue 2	BP-07	Aço CK45	14		0.15	
1	Pino articulação bumerangue 1	BP-06	Aço CK45	13		0.30	
1	Espuma		Poliuretano	12		1.16	
1	Bumerangue balão principal	BP-05	Alumínio 6063-T5	11		3.61	
1	Apoio direito do motor	BP-04	Alumínio 7075-T6	10		0.08	
1	Apoio esquerdo do motor	BP-03	Alumínio 7075-T6	9		0.08	
1	Suporte motor	BP-02	Alumínio 7075-T6	8		0.06	
1	Tampa motor		Alumínio 7075-T6	7		0.27	
1	Tubo exterior do motor		Alumínio 6063-T5	6		0.81	
1	Jante metálica		Alumínio 7075-T6	5		4.75	
1	Tampa roda dentada 2		Alumínio 7075-T6	4		0.50	
1	Tampa roda dentada 1		Alumínio 7075-T6	3		0.25	
1	Disco jante balão		Alumínio 7075-T6	2		1.20	
1	Bloco balão principal	BP-01	Alumínio 7075-T6	1		3.01	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DO DESENHO	MATERIAL	Nº REF.	PRODUTO SEMI ACABADO Nº MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	Observações

BOM Table					
	<i>Proj.</i>	<i>2-7-18</i>	<i>Gonçalo Vieira</i>	<i>Dissertação em Engenharia Mecânica</i>	<i>FCT-UNL Omnidea</i>
	<i>Des.</i>	<i>2-7-18</i>	<i>Gonçalo Vieira</i>		
	<i>Copiou</i>				
	<i>Visto</i>				
	<i>Escala</i>	<i>Sistema de acoplamento balão principal</i>		<i>BP-00</i>	
<i>1:20</i>					
<i>Toleran.</i> <i>NP-265</i> <i>Médio</i>					



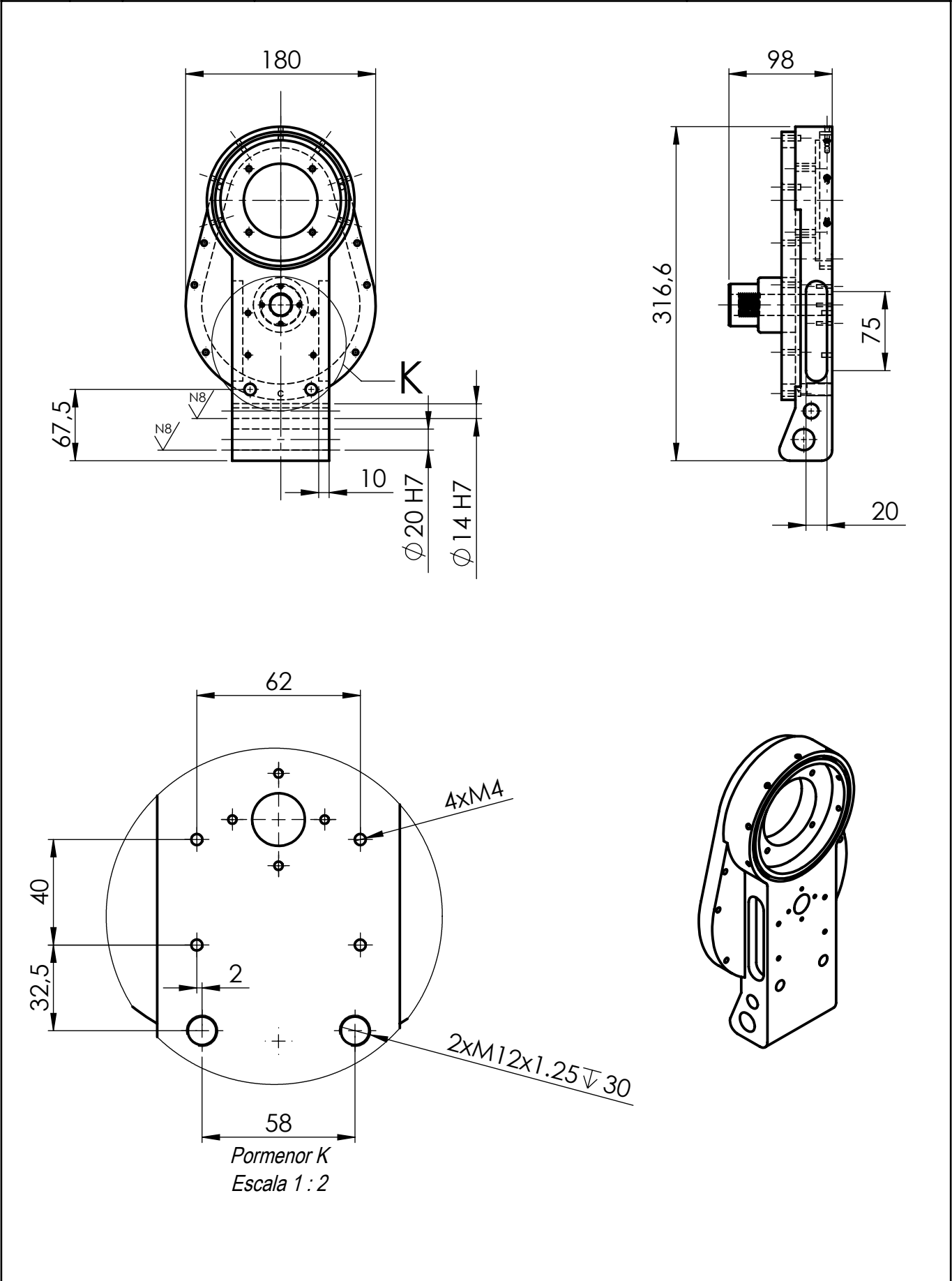
2	Abraçadeira	Ref: WBB513685		40				
1	Cavilha fixação cable grip	BScR-12	Aço CK45	39		0.06		
1	Cable grip	Ref: Zcs1799		38				
3	Casquilho SKF PTFE composite	Ref: PCM 161812 E		37				
1	Peça de ligação cable grip	BScR-11	Aço CK45	36		0.42		
8	Parafuso cabeça sextavada M8 x 30	EN ISO 4017		35				
8	Anilha de chapa M8	ISO 7089		34				
1	Peça com dois olhais para cable grip	BScR-10	Aço CK45	33		0.38		
1	Manilha crosby G-209 5/16	Ref: 1018393		32				
1	Peça com um olhal	BP-09	Aço CK45	31		0.29		
1	Cabo de continuidade extra		Dyneema	30		0.01		
3	Manilha Crosby G-209A 3/8	Ref: 1017450		29				
1	Manilha crosby G-209A 5/8	Ref: 1017516		28				
1	Manilha Crosby G-209A 1/2	Ref: 1017494		27				
3	Troço de mola beta	DIN 11024	Aço inoxidável 1.4310	26		0.01		
3	Cavilha	BScR-09	Aço CK45	25		0.09		
1	Peça de ligação caso extremo	BScR-08	Aço CK45	24		0.55		
1	Peça de ligação	BScR-07	Aço CK45	23		0.50		
4	Parafuso cabeça sextavada M12 x 30	EN ISO 4017		22				
4	Anilha de chapa M12	ISO 7089		21				
1	Peça com dois olhais inclinada	BScR-06	Aço CK45	20		0.31		
1	Peça com dois olhais	BScR-05	Aço CK45	19		0.32		
2	Circlo DIN 471 - 20 x 1.2	DIN 471		18				
3	Circlo DIN 471 - 14 x 1	DIN 471		17				
2	Pino articulação bumerangue 2	BP-07	Aço CK45	16		0.15		
2	Pino articulação bumerangue 1	BP-06	Aço CK45	15		0.30		
2	Espuma		Poliuretano	14		0.77		
1	Bumerangue superior do balão secundário	BScR-04	Alumínio 6063-T5	13		2.42		
1	Bumerangue inferior do balão secundário	BScR-03	Alumínio 6063-T5	12		2.93		
1	Abraçadeira em anel	Ref: WBB359889		11				
1	Apoio direito do motor	BP-04	Alumínio 7075-T6	10		0.08		
1	Apoio esquerdo do motor	BP-03	Alumínio 7075-T6	9		0.08		
1	Suporte motor	BP-02	Alumínio 7075-T6	8		0.06		
1	Tampa motor		Alumínio 7075-T6	7		0.27		
1	Tubo exterior do motor do balão secundário	BScR-02	Alumínio 6063-T5	6		0.81		
1	Jante metálica		Alumínio 7075-T6	5		4.75		
1	Tampa roda dentada 2		Alumínio 7075-T6	4		0.50		
1	Tampa roda dentada 1		Alumínio 7075-T6	3		0.25		
1	Disco jante balão		Alumínio 7075-T6	2		1.20		
1	Bloco balão secundário com rotação	BScR-01	Alumínio 7075-T6	1		3.96		
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DO DESENHO	MATERIAL	Nº REF.	PRODUTO SEMI ACABADO Nº MOLDE    Nº DA MATRIZ	PESO	Observações	

<p>No desenho não está representado o casquilho (35) uma vez que este está situado na zona de contacto entre os componentes 23 e 19 e 20 e componentes 34 e 31.</p> <p>É apresentado o sistema de acoplamento para o caso extremo, isto é, onde é utilizado uma peça de ligação caso extremo e uma manilha G-209A 5/8</p>	Proj.	2-7-18	Gonçalo Vieira	Dissertação em Engenharia Mecânica	FCT-UNL	
	Des.	2-7-18	Gonçalo Vieira		Omnidea	
	Copiou					
	Visto					
Escala	Sistema de acoplamento balão secundário com rotação			BScR-00		
1:20						
Toleran.						
NP-265 Médio						

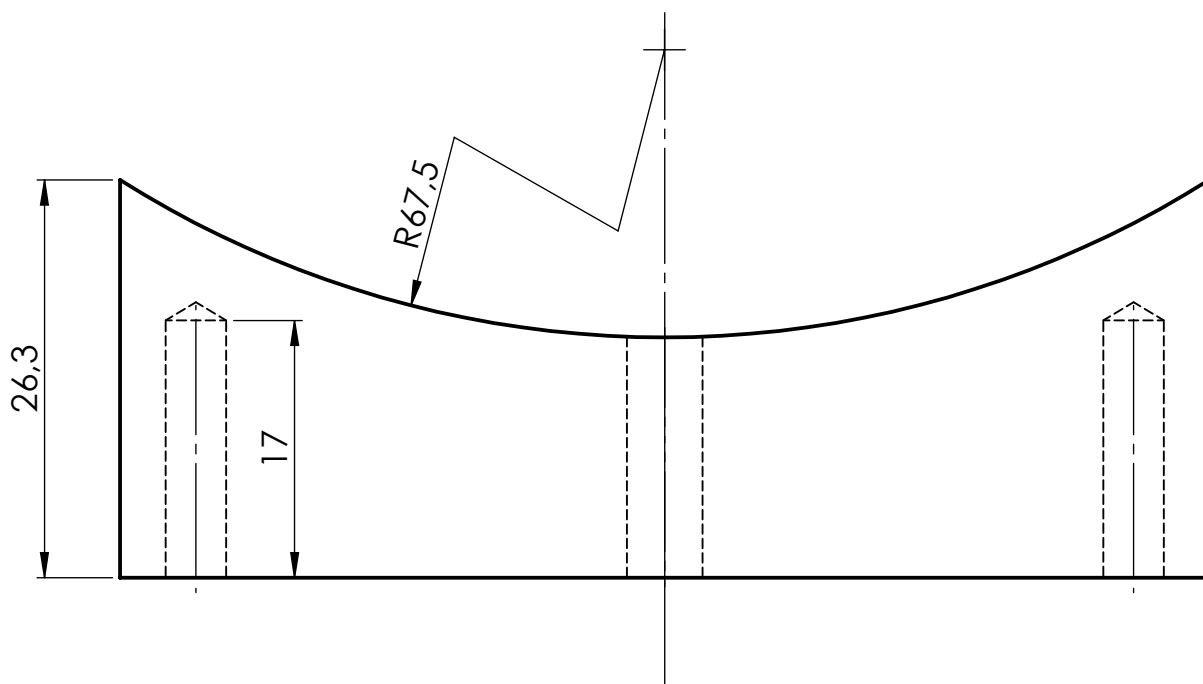
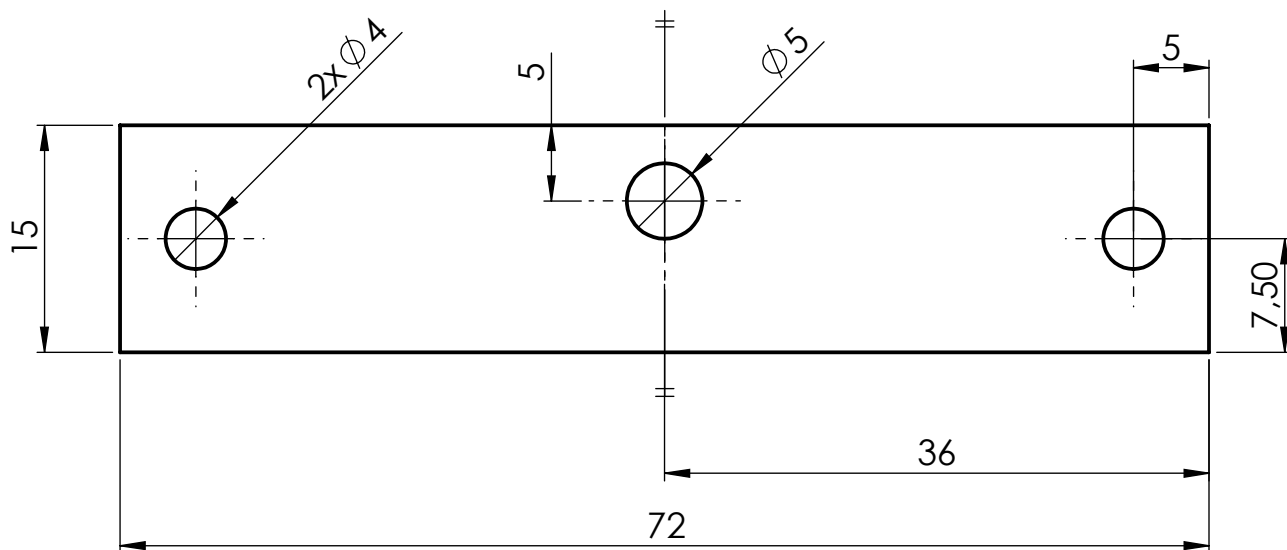


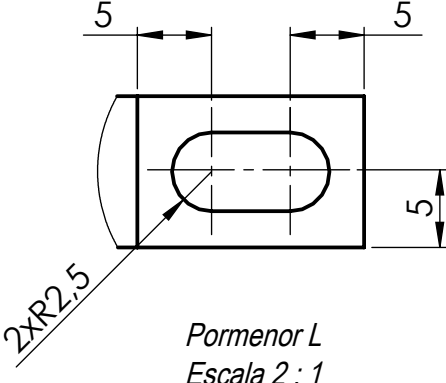
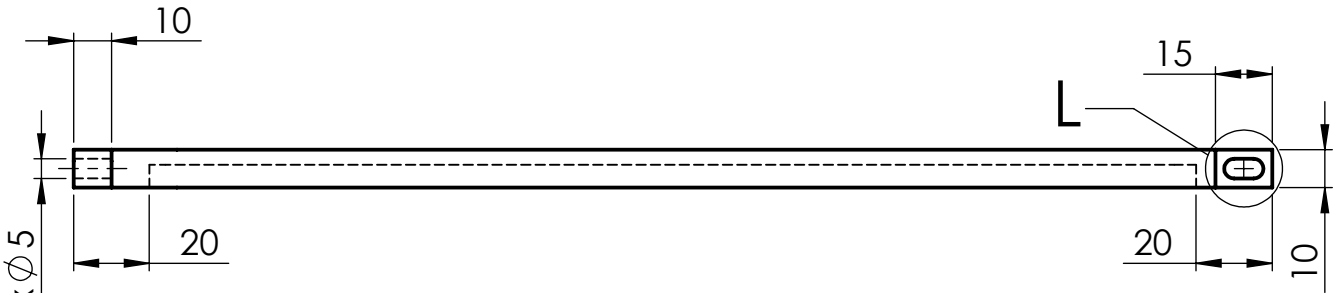
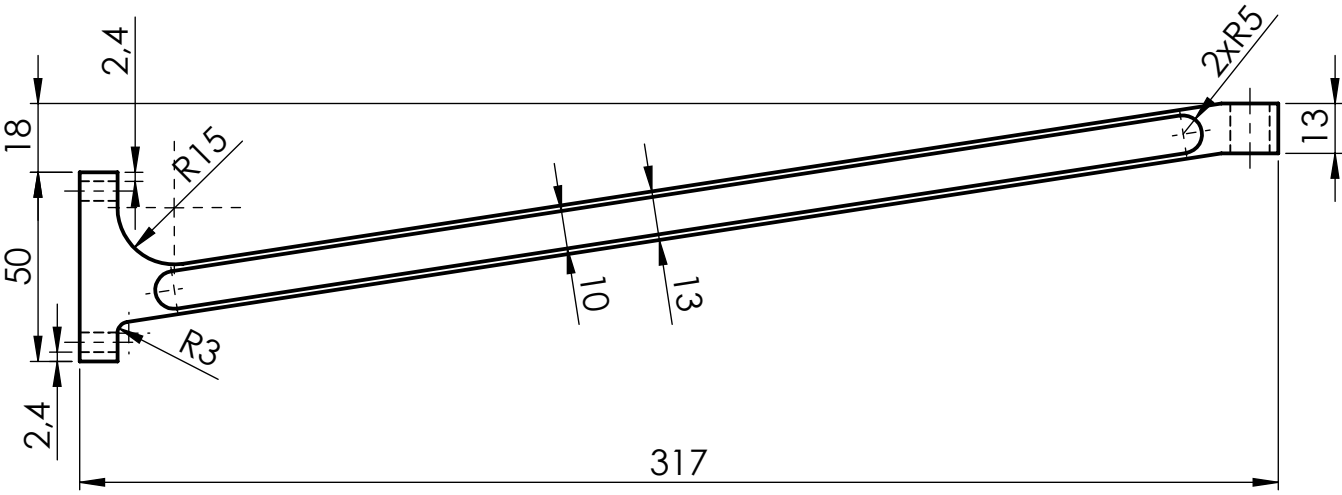
2	Abraçadeira	Ref: WBB513685		30				
1	Cavilha fixação cable grip	BScR-12	Aço CK45	29			0.06	
1	Cable grip	Ref: Zcs1799		28				
2	Casquilho SKF PTFE composite	Ref: PCM 161812 E		27				
1	Peça de ligação cable grip	BScR-11	Aço CK45	26			0.42	
8	Parafuso cabeça sextavada M8 x 30	EN ISO 4017		25				
8	Anilha de chapa M8	ISO 7089		24				
1	Peça com dois olhais para cable grip	BScR-10	Aço CK45	23			0.38	
1	Manilha crosby G-209 5/16	Ref: 1018393		22				
1	Peça com um olhal	BP-09	Aço CK45	21			0.29	
2	Manilha Crosby G-209A 1/2	Ref: 1017494		20				
2	Manilha Crosby G-209A 3/8	Ref: 1017450		19				
2	Troço de mola beta	Din 11024	Aço inoxidável 1.4310	18			0.01	
2	Cavilha	BScR-09	Aço CK45	17			0.09	
1	Peça de ligação	BScR-07	Aço CK45	16			0.50	
2	Parafuso cabeça sextavada M12 x 30	EN ISO 4017		15				
2	Anilha de chapa M12	ISO 7089		14				
1	Peça com dois olhais	BScR-05	Aço CK45	13			0.32	
2	Circlip DIN 471 - 20 x 1.2	DIN 471		12				
3	Circlip DIN 471 - 14 x 1	DIN 471		11				
2	Pino articulação bumerangue 2	BP-07	Aço CK45	10			0.15	
2	Pino articulação bumerangue 1	BP-06	Aço CK45	9			0.30	
2	Espuma		Poliuretano	8			0.77	
1	Bumerangue superior do balão secundário	BScR-04	Alumínio 6063-T5	7			2.42	
1	Bumerangue inferior do balão secundário	BScR-03	Alumínio 6063-T5	6			2.93	
1	Jante metálica		Alumínio 7075-T6	5			4.75	
1	Tampa roda dentada 2		Alumínio 7075-T6	4			0.50	
1	Tampa roda dentada 1		Alumínio 7075-T6	3			0.25	
1	Disco jante balão		Alumínio 7075-T6	2			1.20	
1	Bloco balão secundário sem rotação	BSsR-01	Alumínio 7075-T6	1			3.93	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DO DESENHO	MATERIAL	Nº REF.	PRODUTO SEMI ACABADO Nº MOLDE    Nº DA MATRIZ		PESO	Observações

<i>No desenho não está representado o casquilho (27) uma vez que este está situado na zona de contacto entre os componentes 16 e 13 e componentes 26 e 23.</i>	<i>Proj.</i>	<i>2-7-18</i>	<i>Gonçalo Vieira</i>	<i>Dissertação em Engenharia Mecânica</i>	<i>FCT-UNL Omnidea</i>				
	<i>Des.</i>	<i>2-7-18</i>	<i>Gonçalo Vieira</i>						
	<i>Copiou</i>								
	<i>Visto</i>								
	<i>Escala</i>	<i>Sistema de acoplamento balão secundário sem rotação</i>				<i>BSsR-00</i>			
<i>1:20</i>									
<i>Toleran.</i>									
<i>NP-265</i>									
<i>Médio</i>									

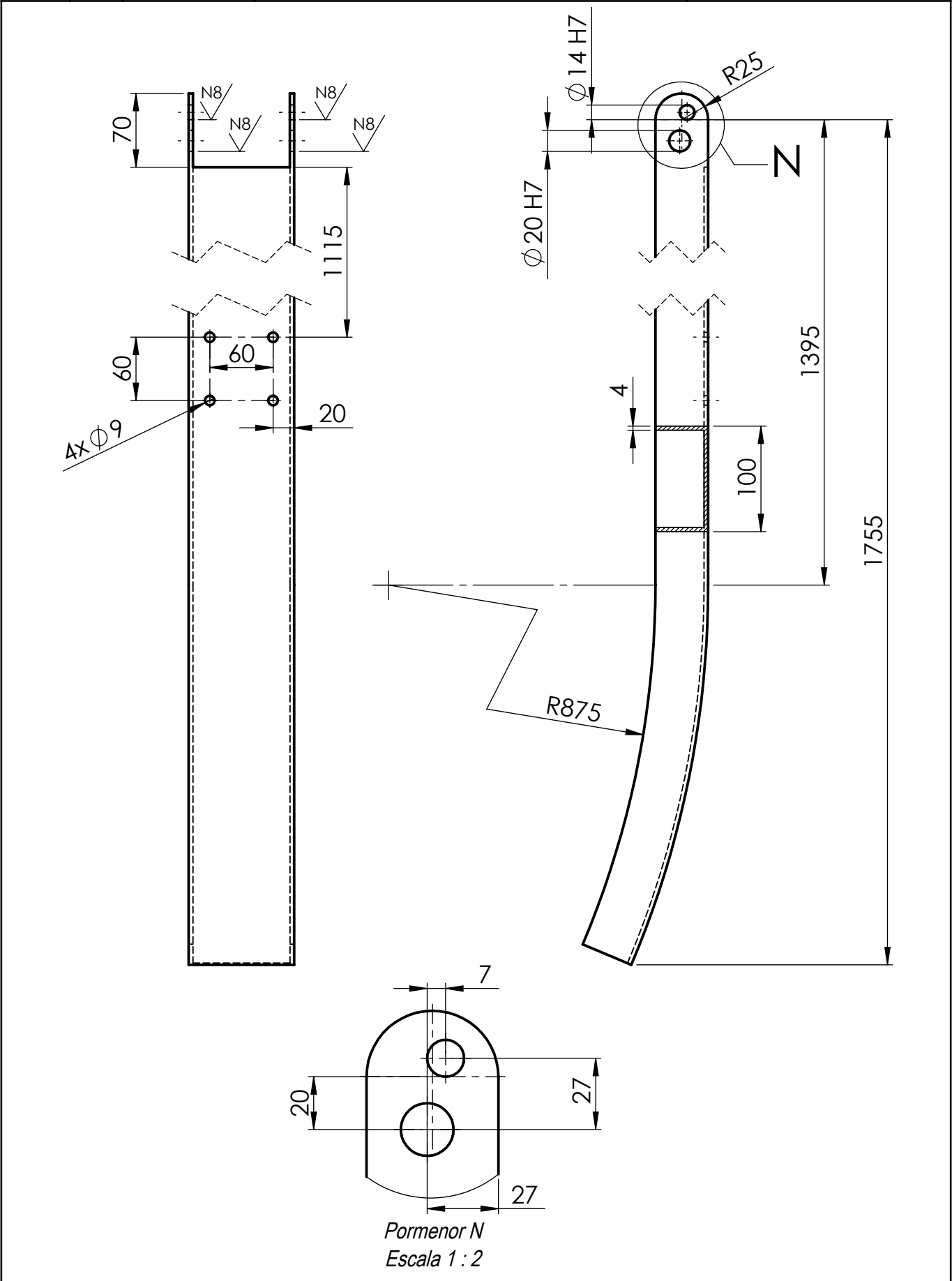








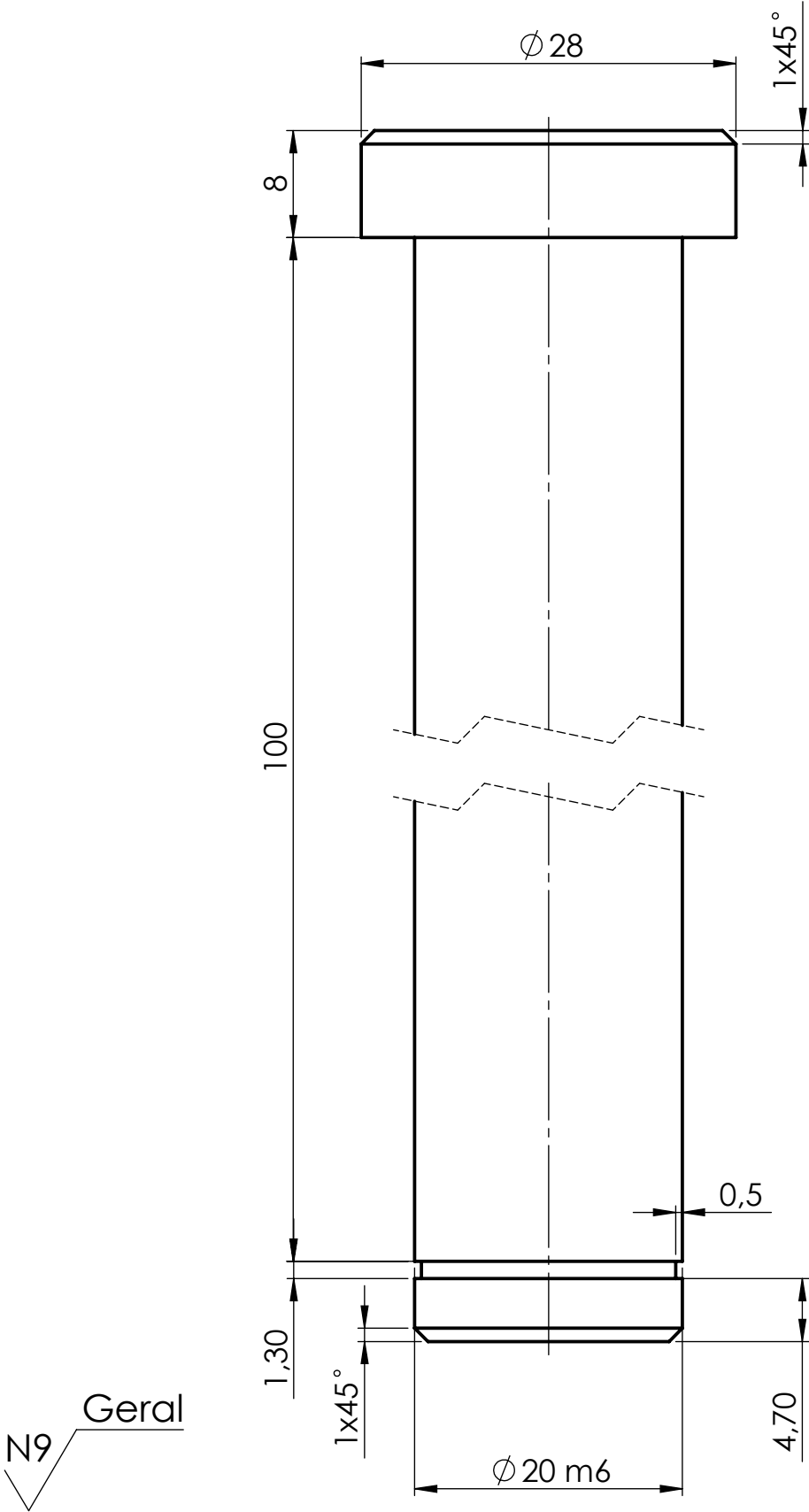




Proj.	3-7-18	Gonalo Vieira
Des.	3-7-18	Gonalo Vieira
Copiou		
Visto		

Dissertao em  
Engenharia Mecnica

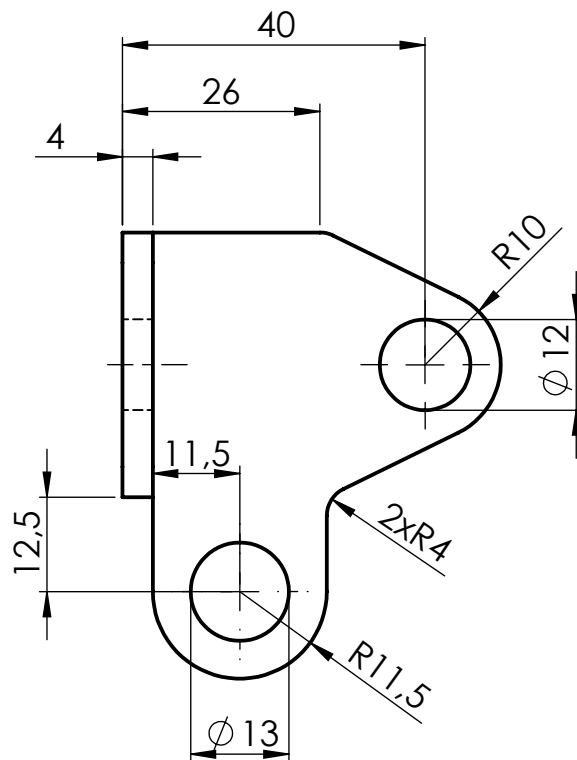
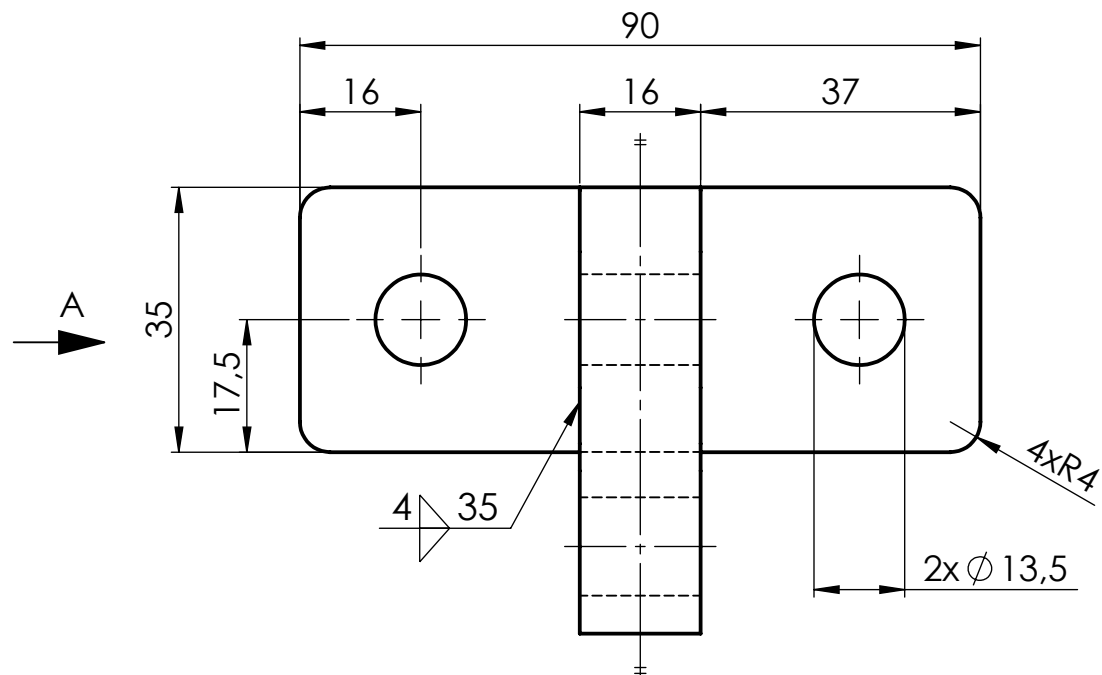
FCT-UNL  
Omnidea



	2:1	Pino articulação bumerangue 1	BP-06					
	NP-265 Médio							

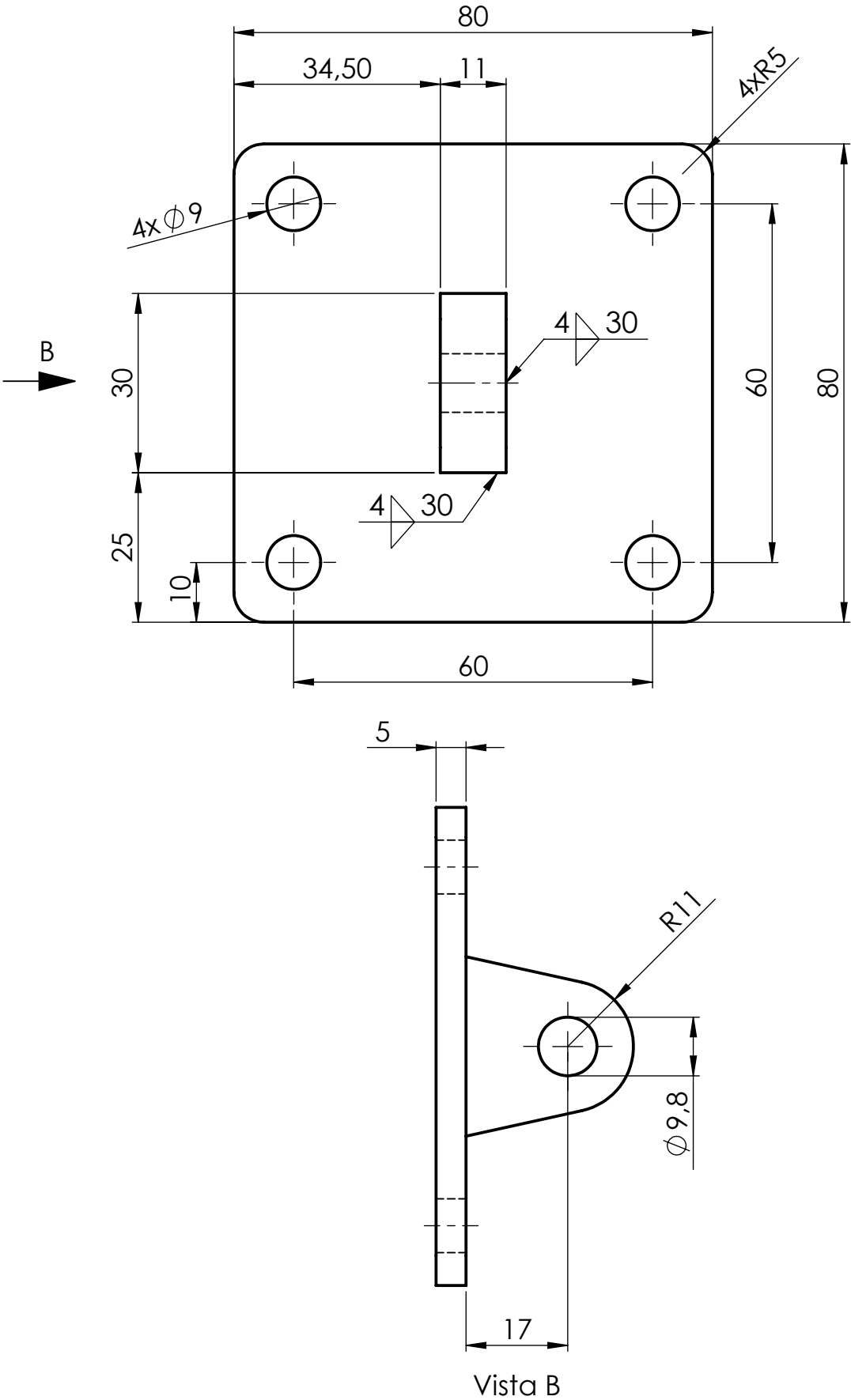


Proj.	3-7-18	Gonalo Vieira	<div>Dissertao em Engenharia Mecnica</div>	<div>FCT-UNL Omnidea</div>
Des.	3-7-18	Gonalo Vieira		
Copiou				
Visto				

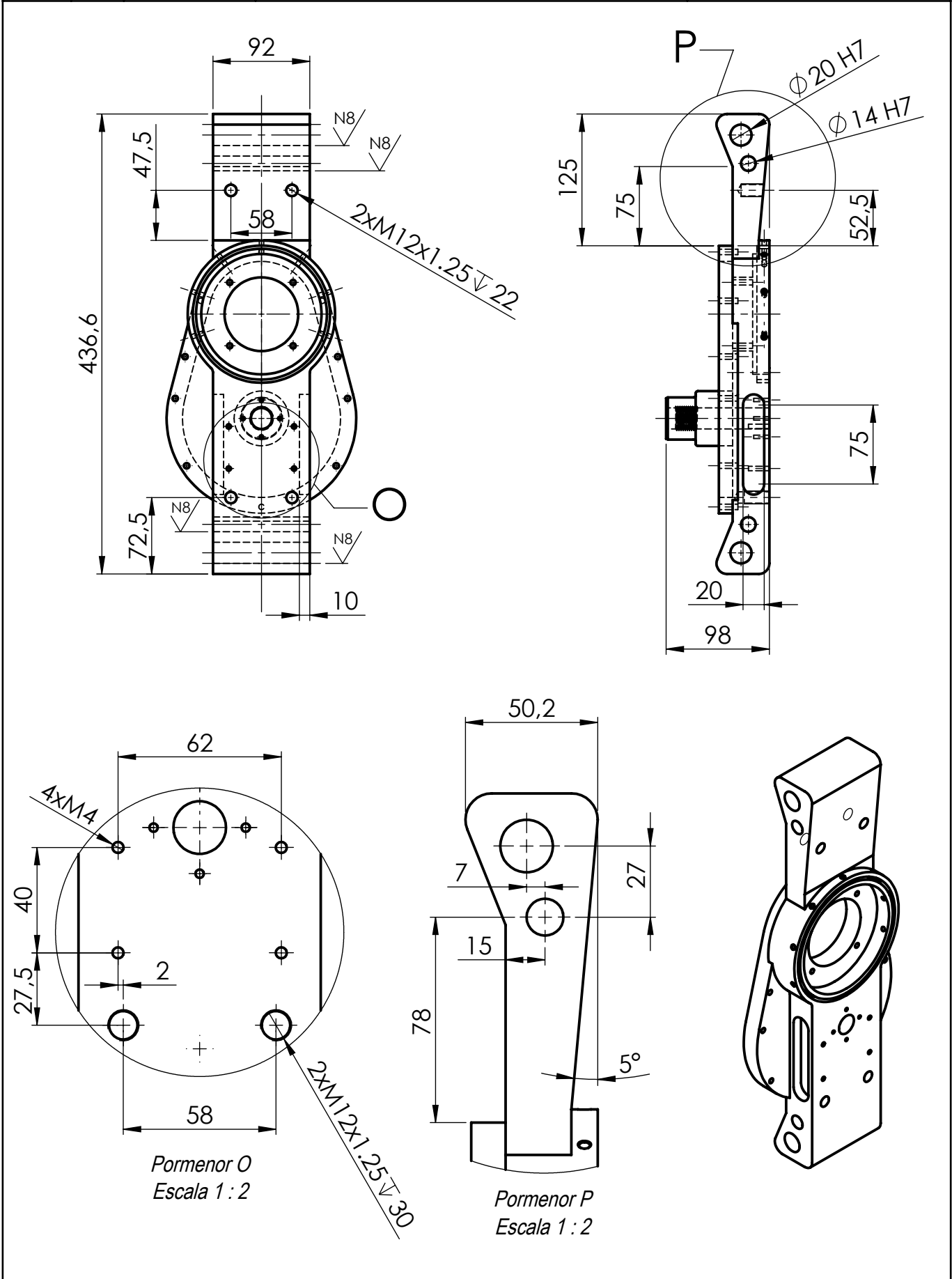


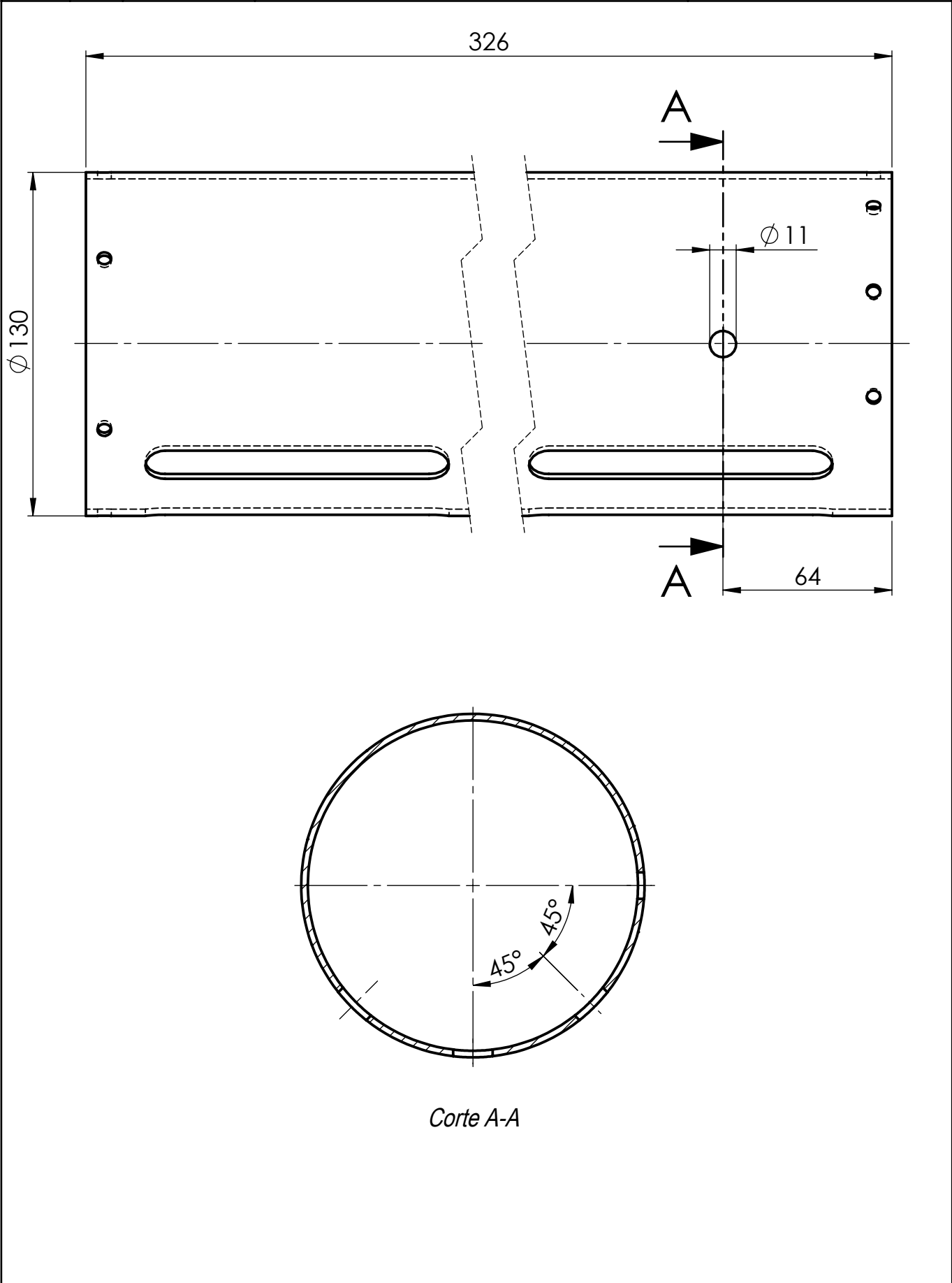
Vista A

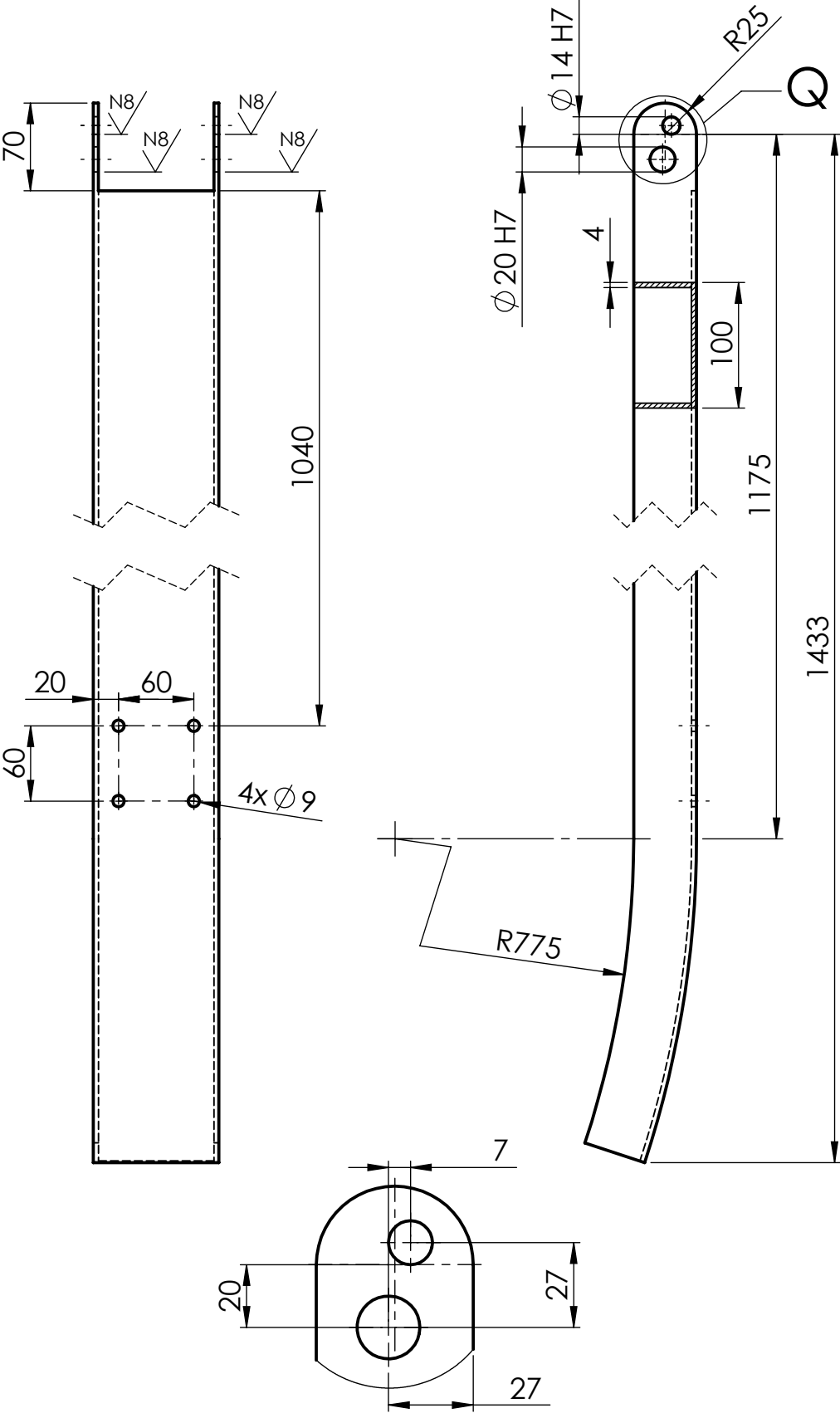
	1:1	<div>Pea de ligao bloco/BP</div>	<div>BP-08</div>
	NP-265 Médio		



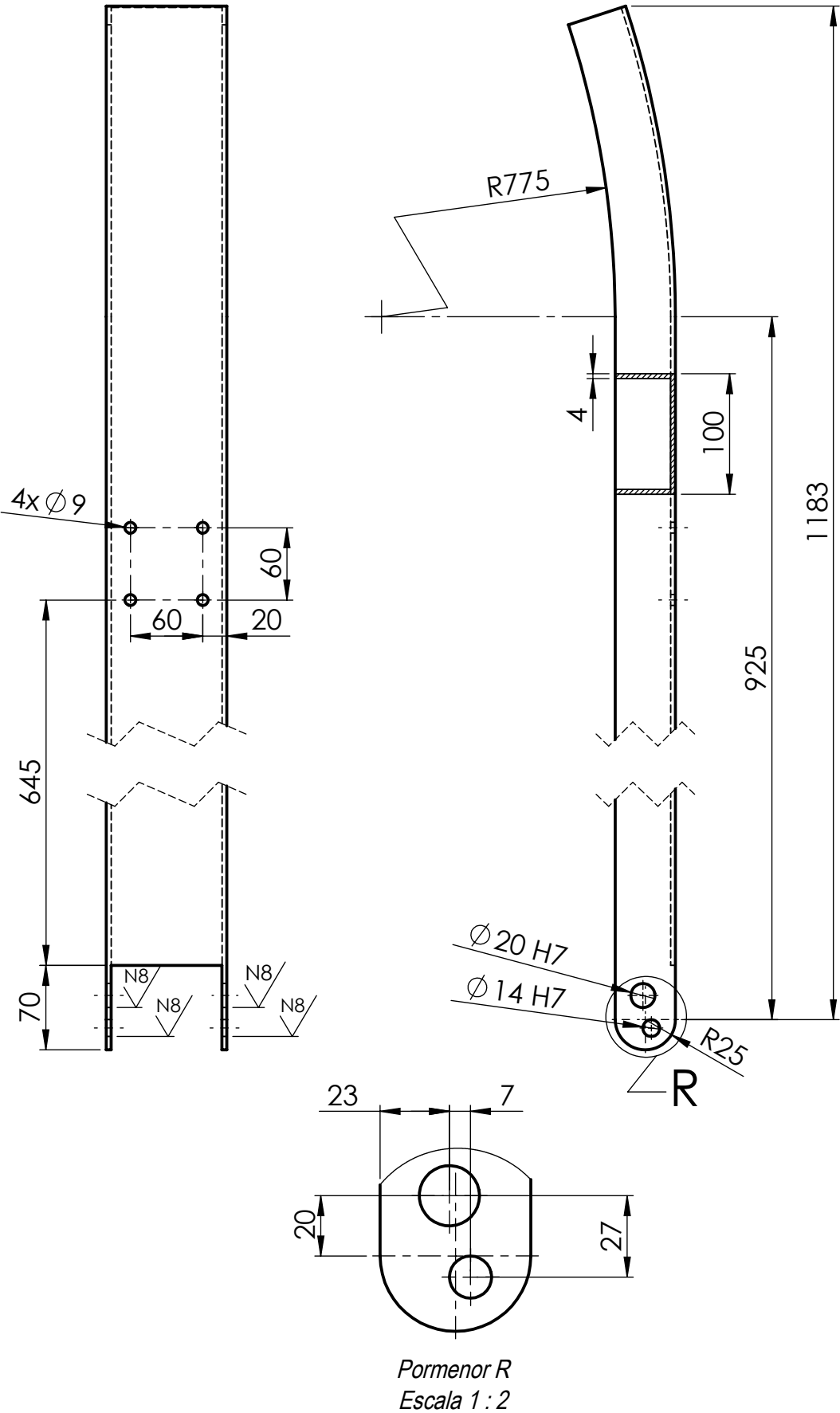








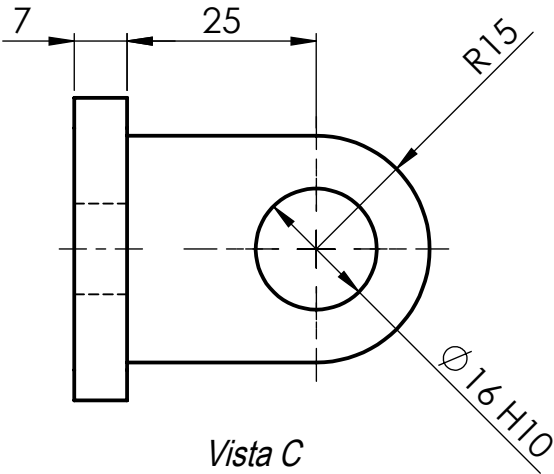
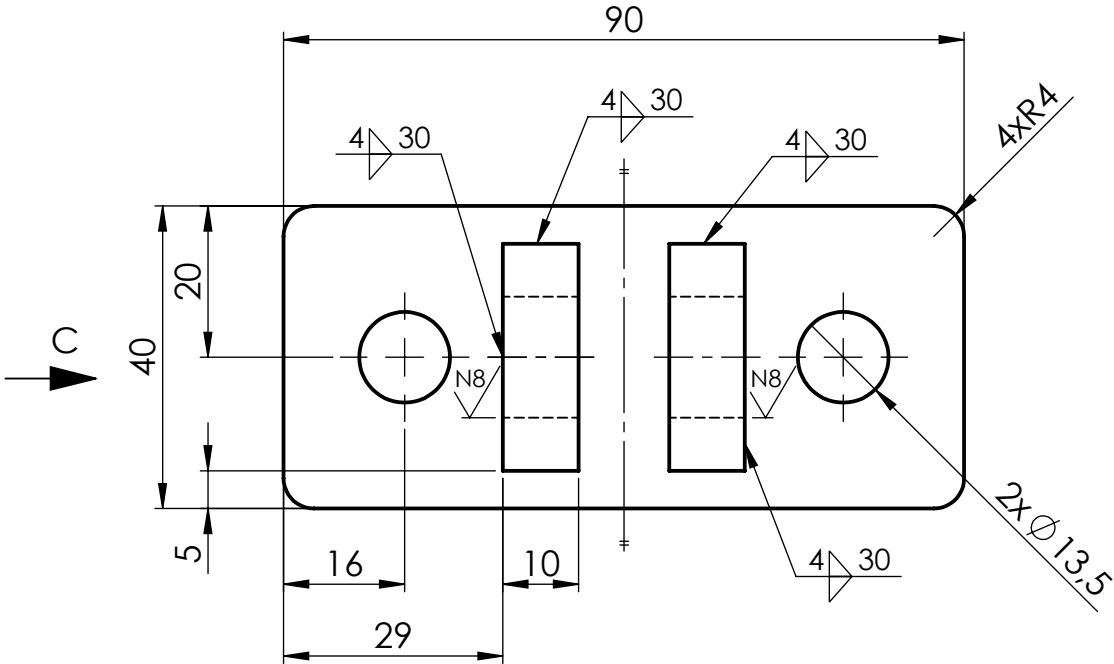
Pormenor Q  
Escala 1 : 2



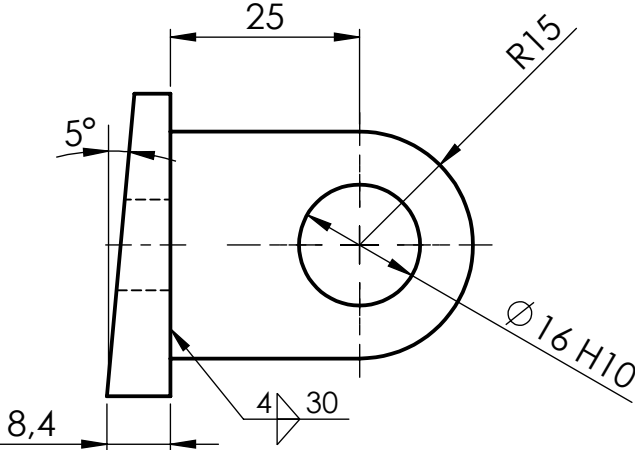
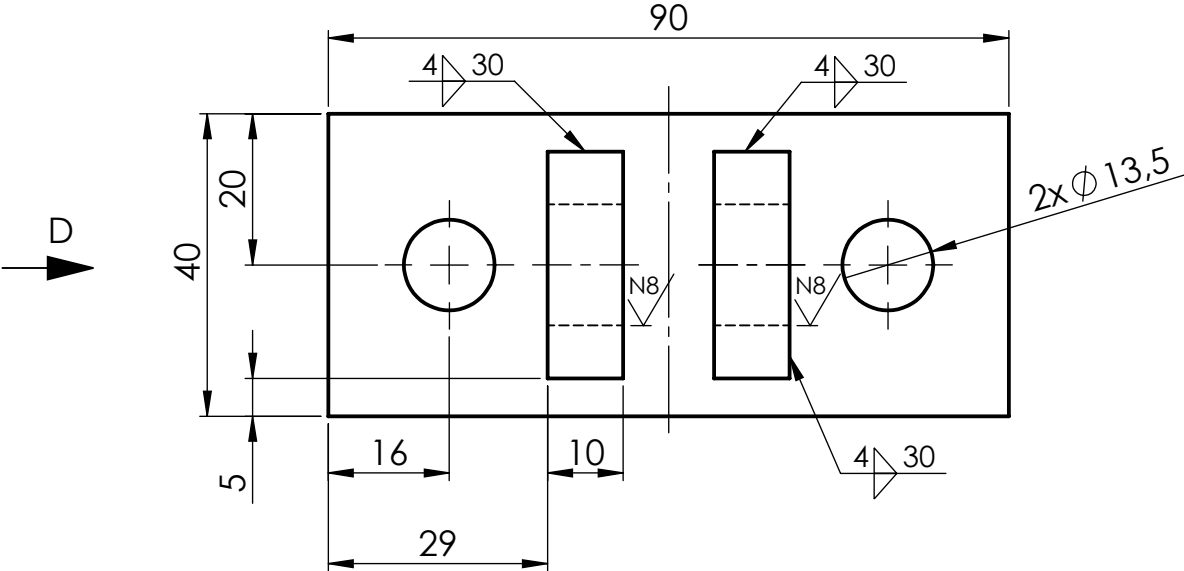
Proj.	3-7-18	Gonalo Vieira
Des.	3-7-18	Gonalo Vieira
Copiou		
Visto		

Dissertao em  
Engenharia Mecnica

FCT-UNL  
Omnidea

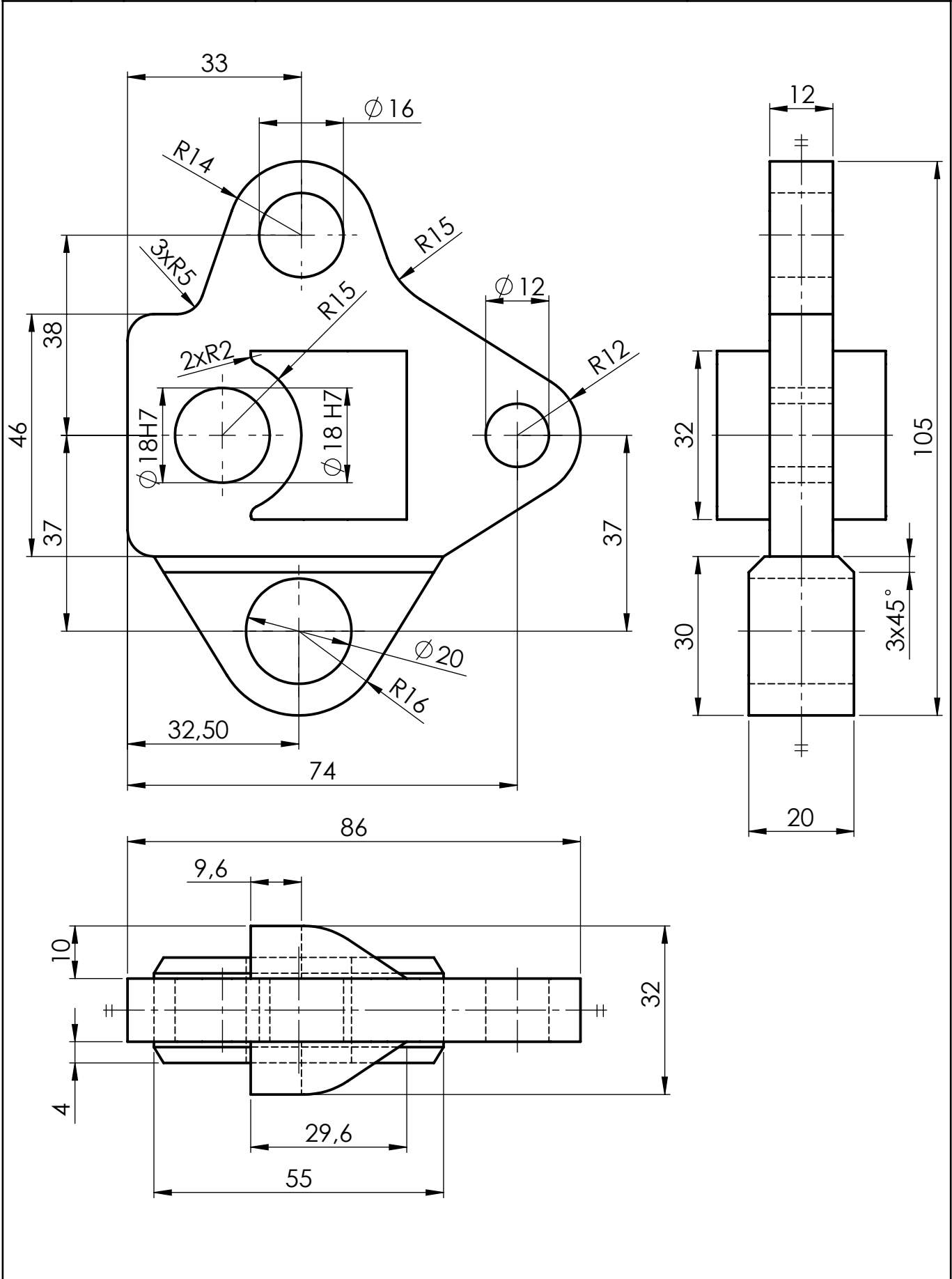


	1:1	Pea com dois olhais	BScR-05					
	NP-265 Médio							

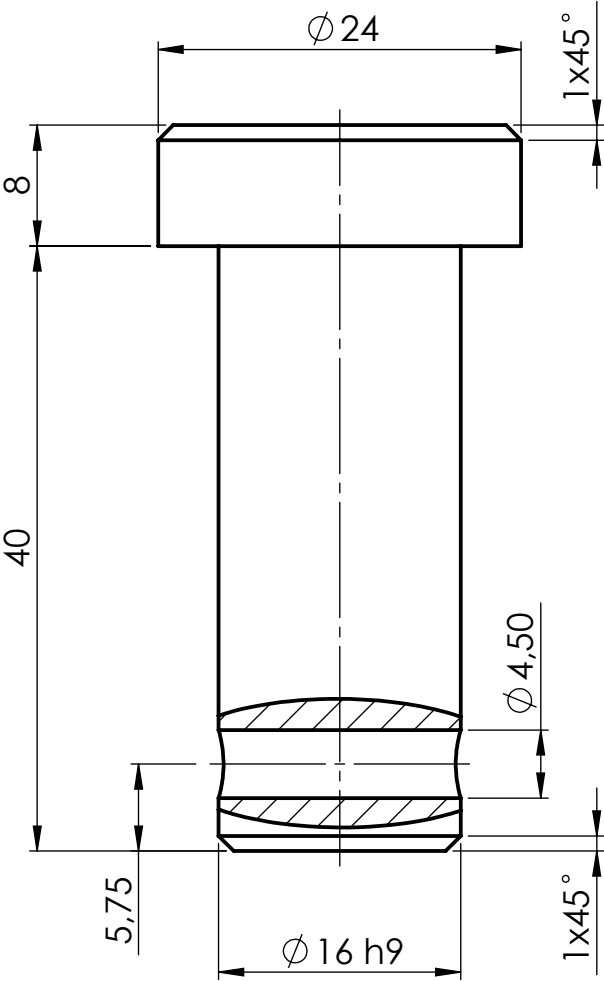


Vista D



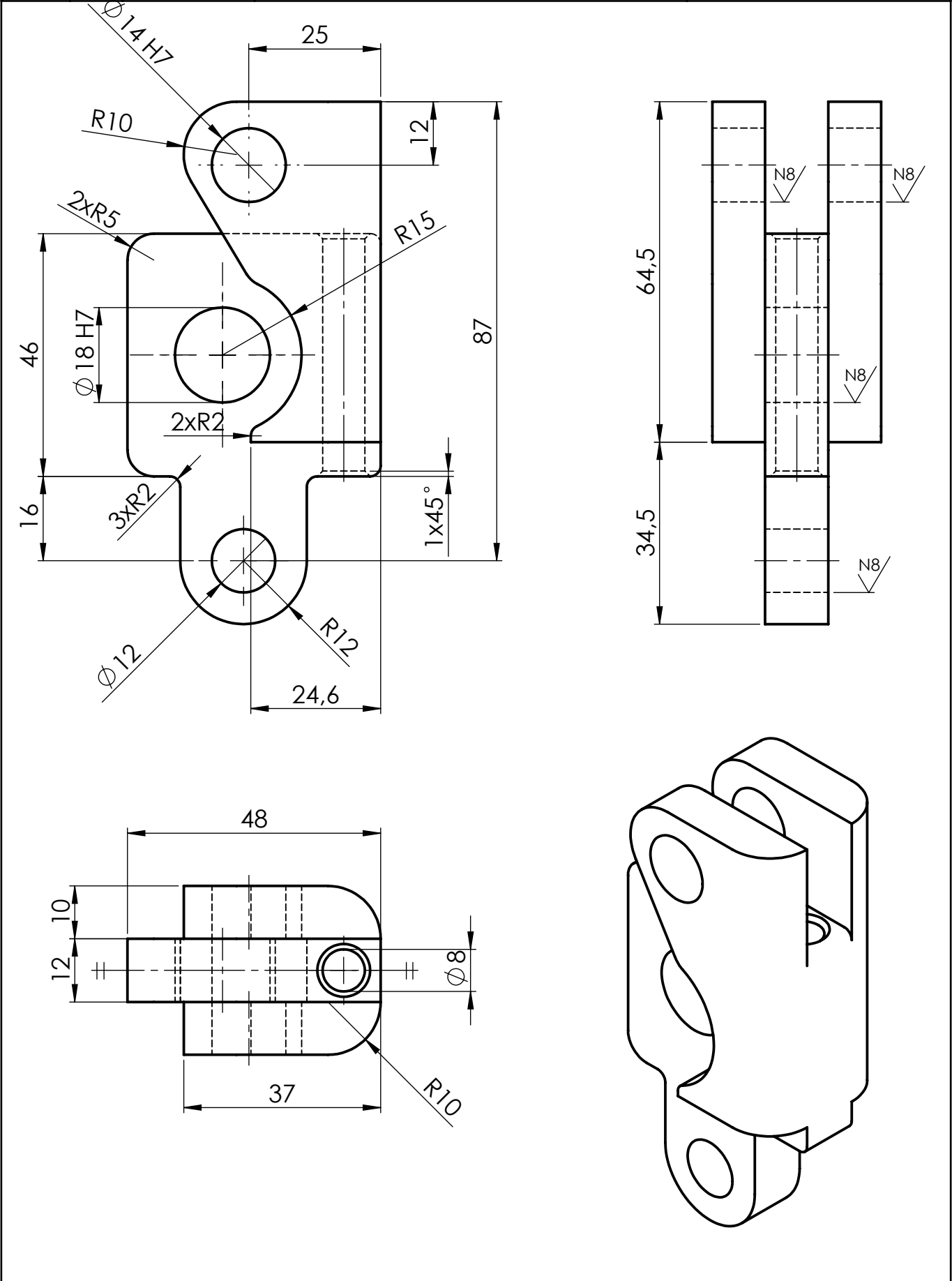


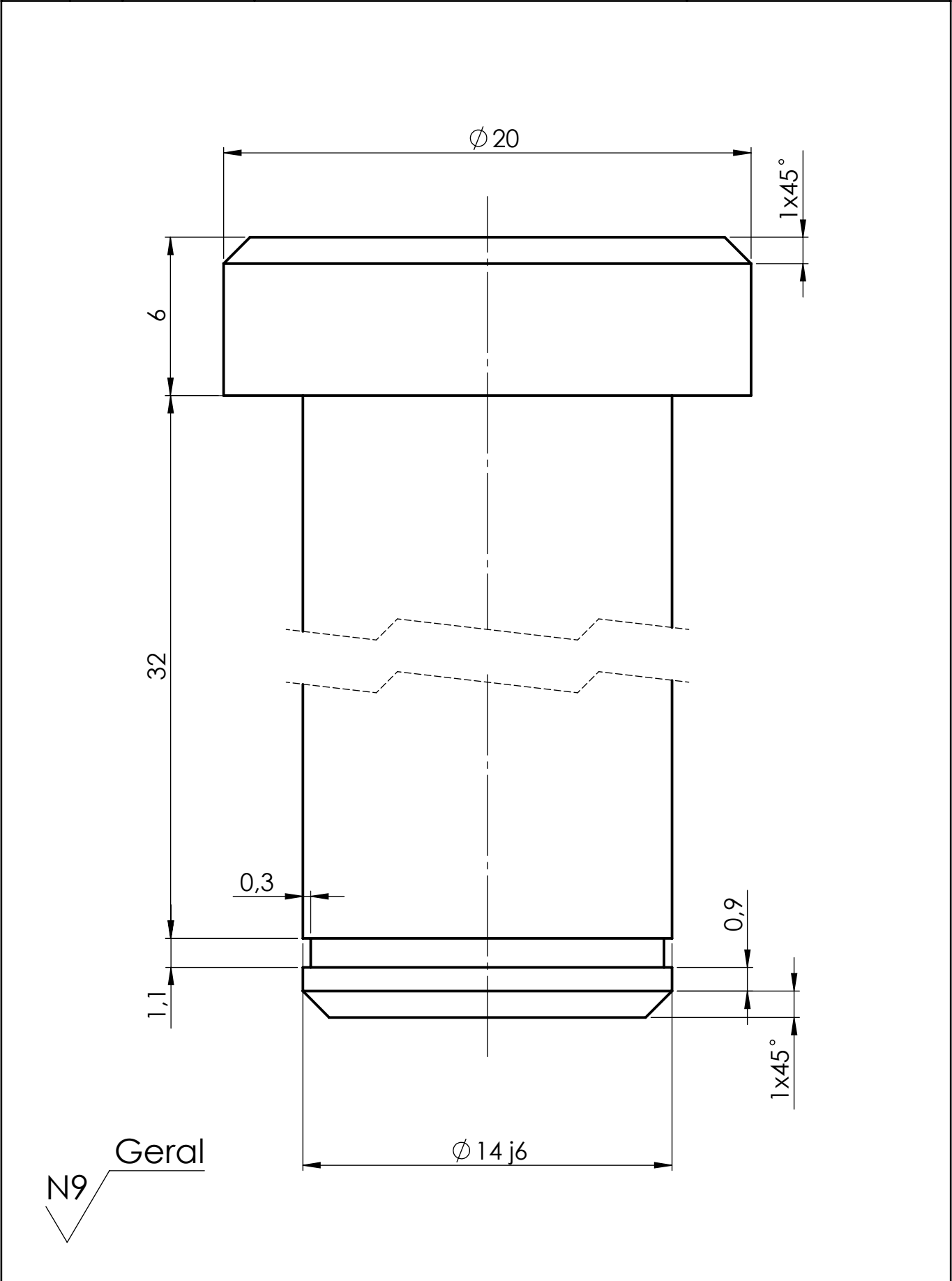


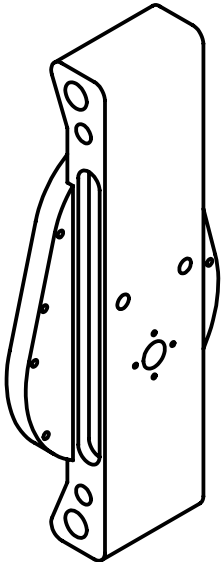
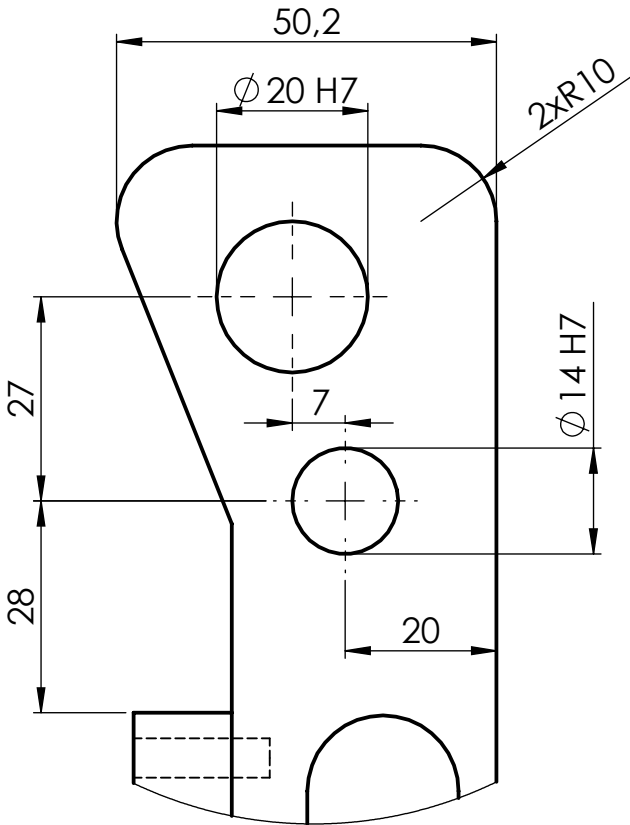
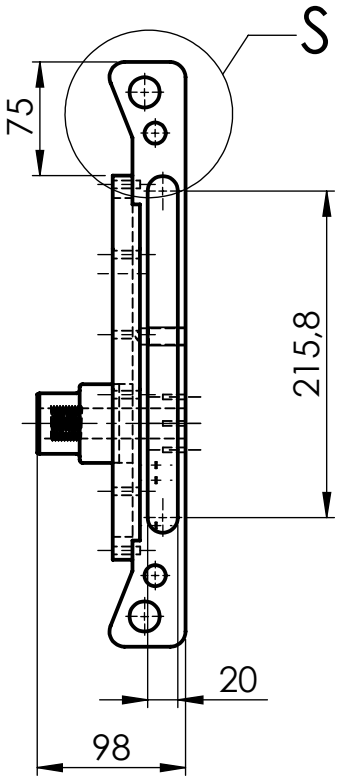
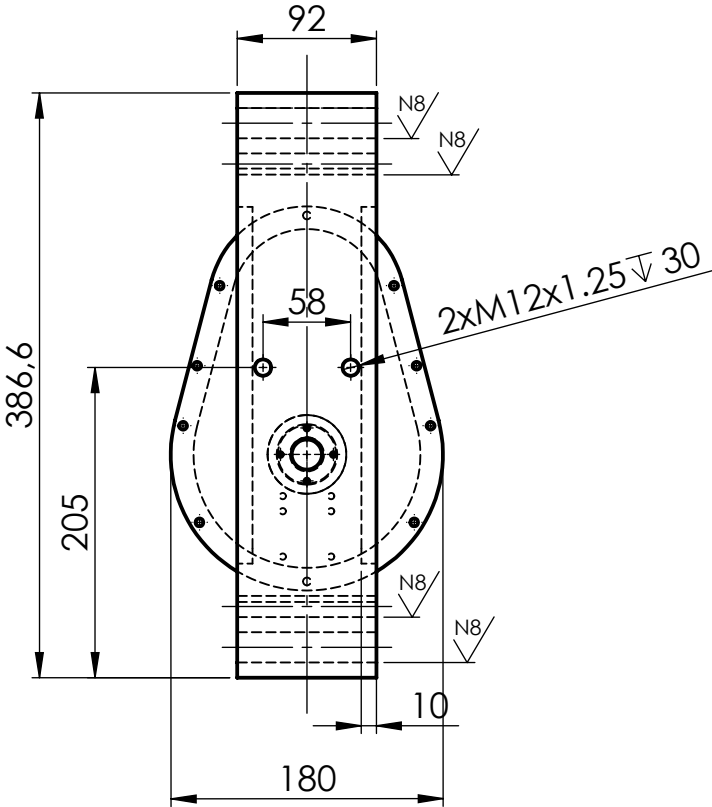


N9  Geral

**SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.**







Pormenor S  
Escala 1 : 1

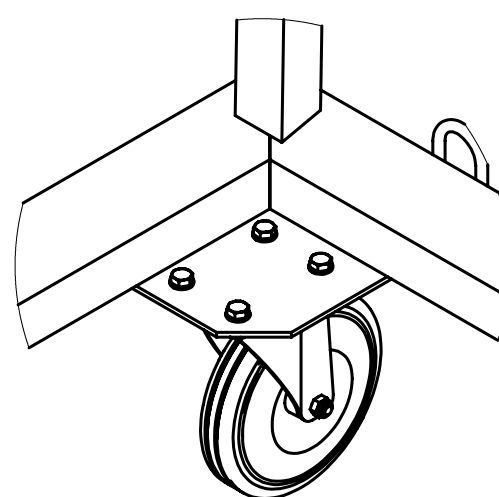
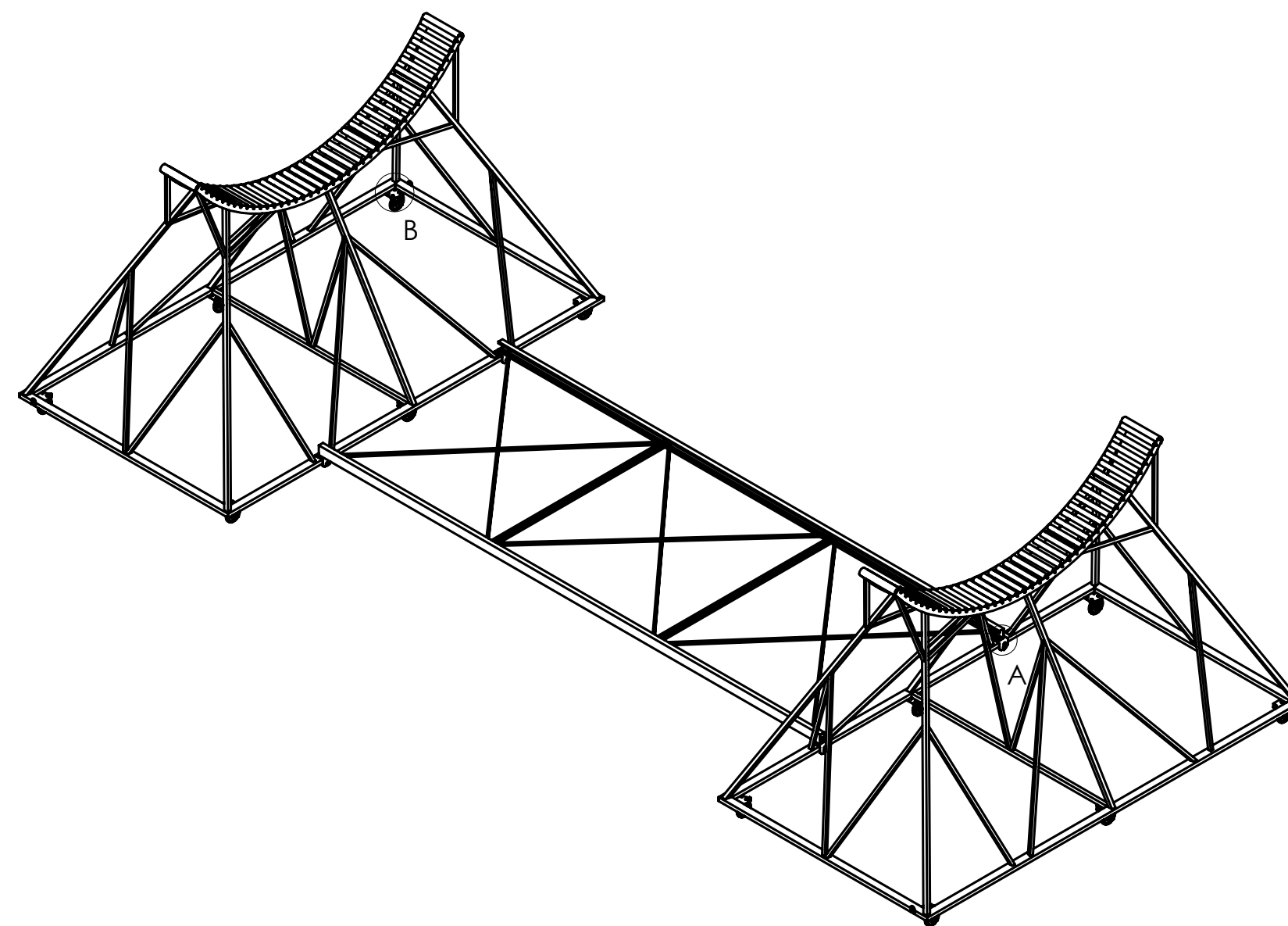
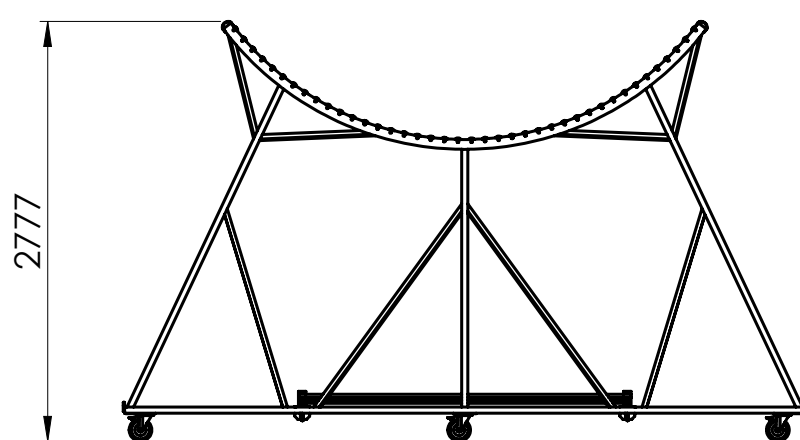
## Anexo K

Neste anexo são agrupados os desenhos técnicos referentes à estrutura auxiliar dos processos de aterragem e descolagem.

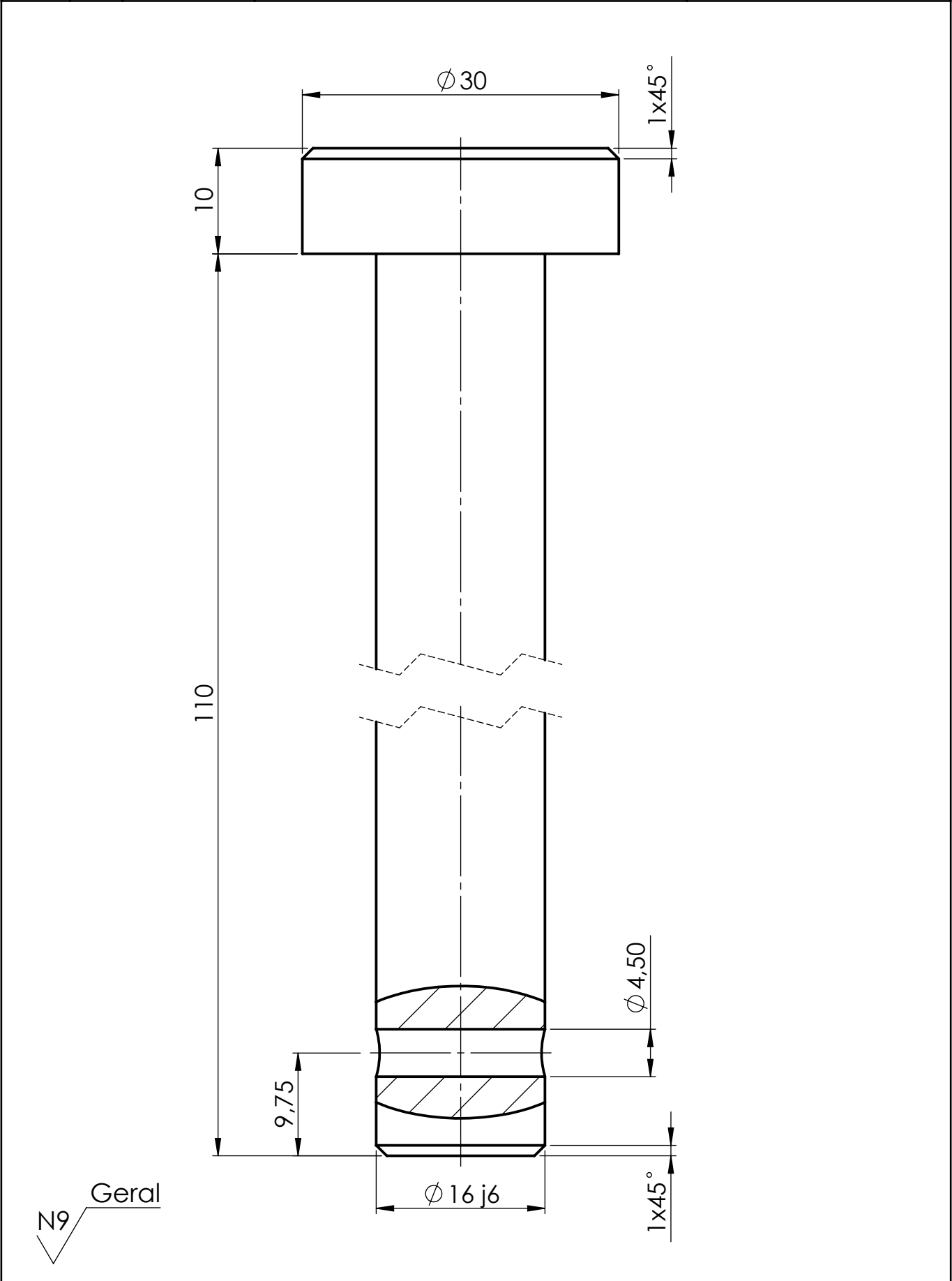
Os desenhos realizados são os seguintes:

***Tabela K1: Desenhos técnicos referentes à estrutura auxiliar dos processos de aterragem e descolagem.***

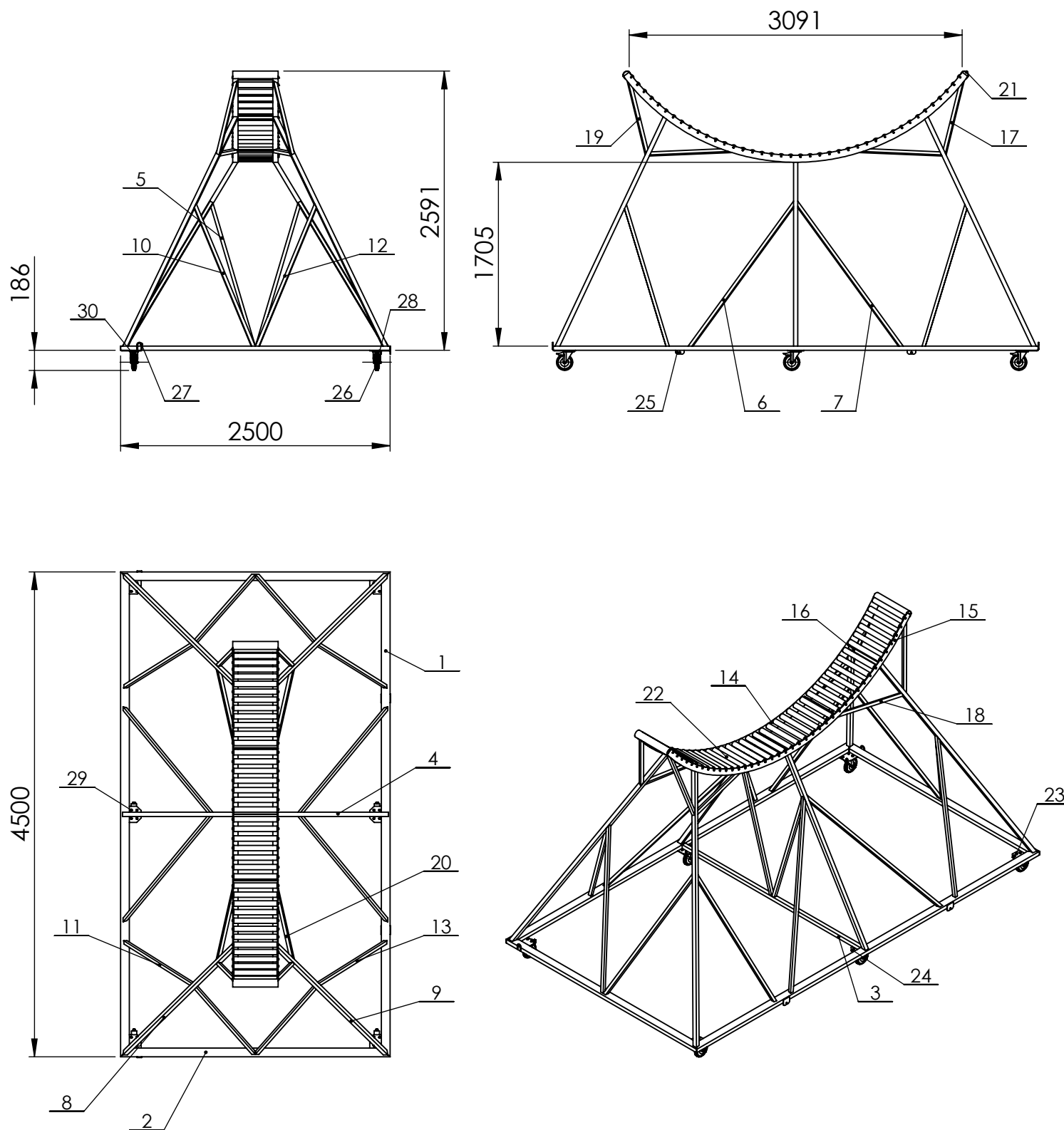
Sistema/Componente	Designação do desenho
Conjunto geral da estrutura auxiliar	Estrutura-00
Pino de ligação	Estrutura-01
Subsistema em forma de torre	Torre-00
Perfil base 1	Torre-01
Perfil base 2	Torre-02
Perfil meio	Torre-03
Travamento meio 1	Torre-04
Travamento meio 2	Torre-05
Travamento meio 3	Torre-06
Perfil canto 1	Torre-07
Perfil canto 2	Torre-08
Travamento frontal 1	Torre-09
Travamento lateral 1	Torre-10
Travamento frontal 2	Torre-11
Travamento lateral 2	Torre-12
Cantoneira Esquerda	Torre-13
Cantoneira Direita	Torre-14
Reforço frontal canto 1	Torre-15
Reforço lateral canto 1	Torre-16
Reforço frontal canto 2	Torre-17
Reforço lateral canto 2	Torre-18
Chapa de proteção em U	Torre-19
Chapa Fixação Rodas do Canto	Torre-20
Chapa Fixação Rodas do Meio	Torre-21
Chapa de ligação	Torre-22
Varão redondo	Torre-23
Subsistema de ligação	Ligação-00
Cruzeta 1	Ligação-01
Cruzeta 2	Ligação-02
Peça fixação à base	Ligação-03



*Pormenor B*  
*Escala 1:5*







24	Porca sextavada M8	ISO 4032		30			
24	Parafuso cabeça sextavada M8 x 16	EN ISO 4017		29			
48	Anilha de chapa M8	ISO 7089		28			
2	Varão redondo	Torre-23	Aço S235JRH	27		0.06	
6	Roda de transporte Eles	Ref. Re.E3-150-SBF		26			
4	Chapa de ligação	Torre-22	Aço S235JRH	25		0.16	
2	Chapa Fixação Rodas do Meio	Torre-21	Aço S235JRH	24		0.78	
4	Chapa Fixação Rodas do Canto	Torre-20	Aço S235JRH	23		1.07	
40	Rolo transportador universal Interroll série 1700	1.7X3.JAA,LAC-400		22			
2	Chapa de proteção em U	Torre-19	Aço S235JRH	21		1.39	
2	Reforço lateral canto 2	Torre-18	Aço S235JRH	20		1.26	
2	Reforço frontal canto 2	Torre-17	Aço S235JRH	19		1.16	
2	Reforço lateral canto 1	Torre-16	Aço S235JRH	18		1.26	
2	Reforço frontal canto 1	Torre-15	Aço S235JRH	17		1.16	
5	Perfil T 40x35mm (L=412mm)	EN 10055	Aço S235JRH	16		1.06	
1	Cantoneira Direita	Torre-14	Aço S235JRH	15		15.65	
1	Cantoneira Esquerda	Torre-13	Aço S235JRH	14		15.65	
2	Travamento lateral 2	Torre-12	Aço S235JRH	13		2.60	
2	Travamento frontal 2	Torre-11	Aço S235JRH	12		2.68	
2	Travamento lateral 1	Torre-10	Aço S235JRH	11		2.60	
2	Travamento frontal 1	Torre-09	Aço S235JRH	10		2.68	
2	Perfil canto 2	Torre-08	Aço S235JRH	9		6.05	
2	Perfil canto 1	Torre-07	Aço S235JRH	8		6.05	
2	Travamento meio 3	Torre-06	Aço S235JRH	7		3.16	
2	Travamento meio 2	Torre-05	Aço S235JRH	6		3.16	
2	Travamento meio 1	Torre-04	Aço S235JRH	5		2.38	
2	Perfil meio	Torre-03	Aço S235JRH	4		4.72	
1	Perfil base 3		Aço S235JRH	3		5.55	
2	Perfil base 2	Torre-02	Aço S235JRH	2		12.91	
2	Perfil base 1	Torre-01	Aço S235JRH	1		23.58	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DO DESENHO	MATERIAL	Nº REF.	PRODUTO SEMI ACABADO Nº MOLDE    Nº DA MATRIZ		PESO    Observações

Proj. 28-6-18 Gonçalo Vieira  
Des. 28-6-18 Gonçalo Vieira  
Copiou  
Visto

Dissertação em  
Engenharia Mecânica

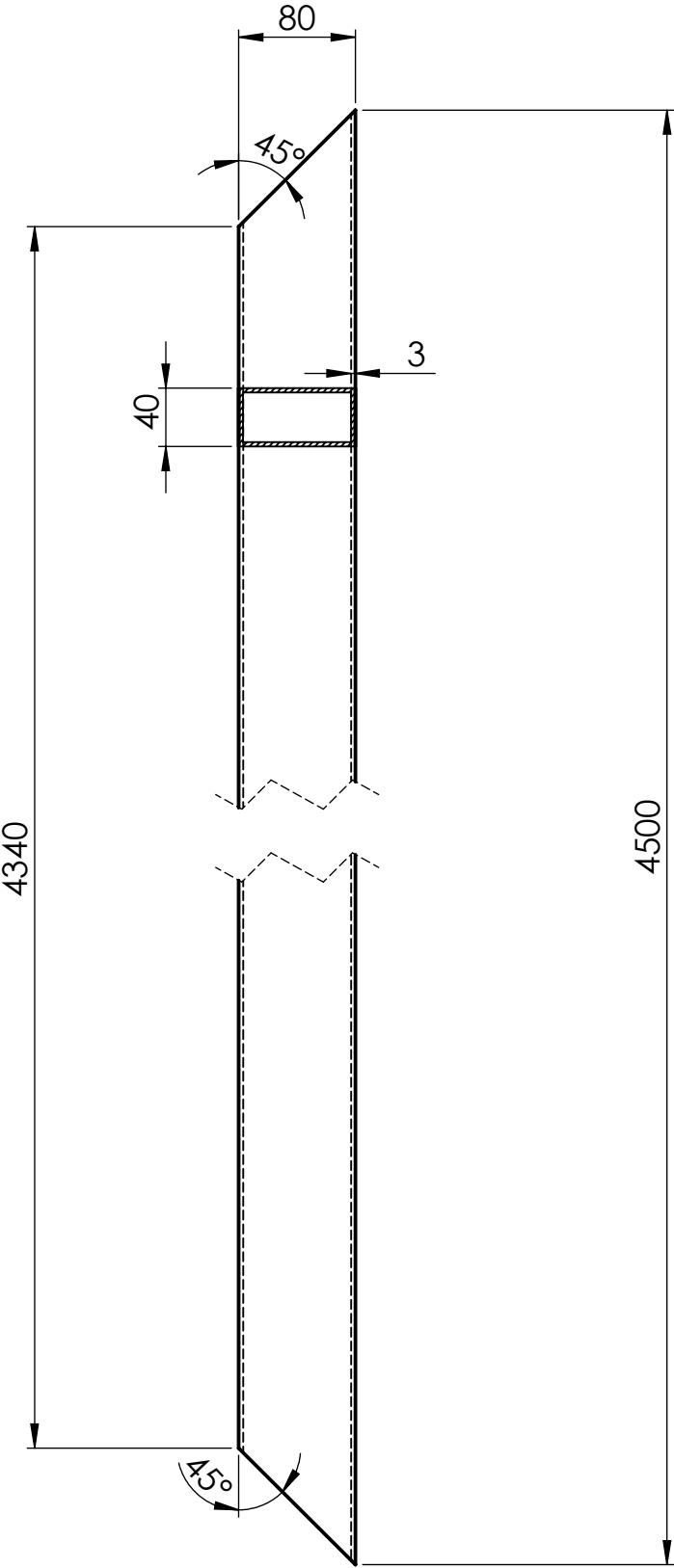
FCT-UNL  
Omnidea

Escala  
1:50  
  
Toleran.  
NP-265  
Médio

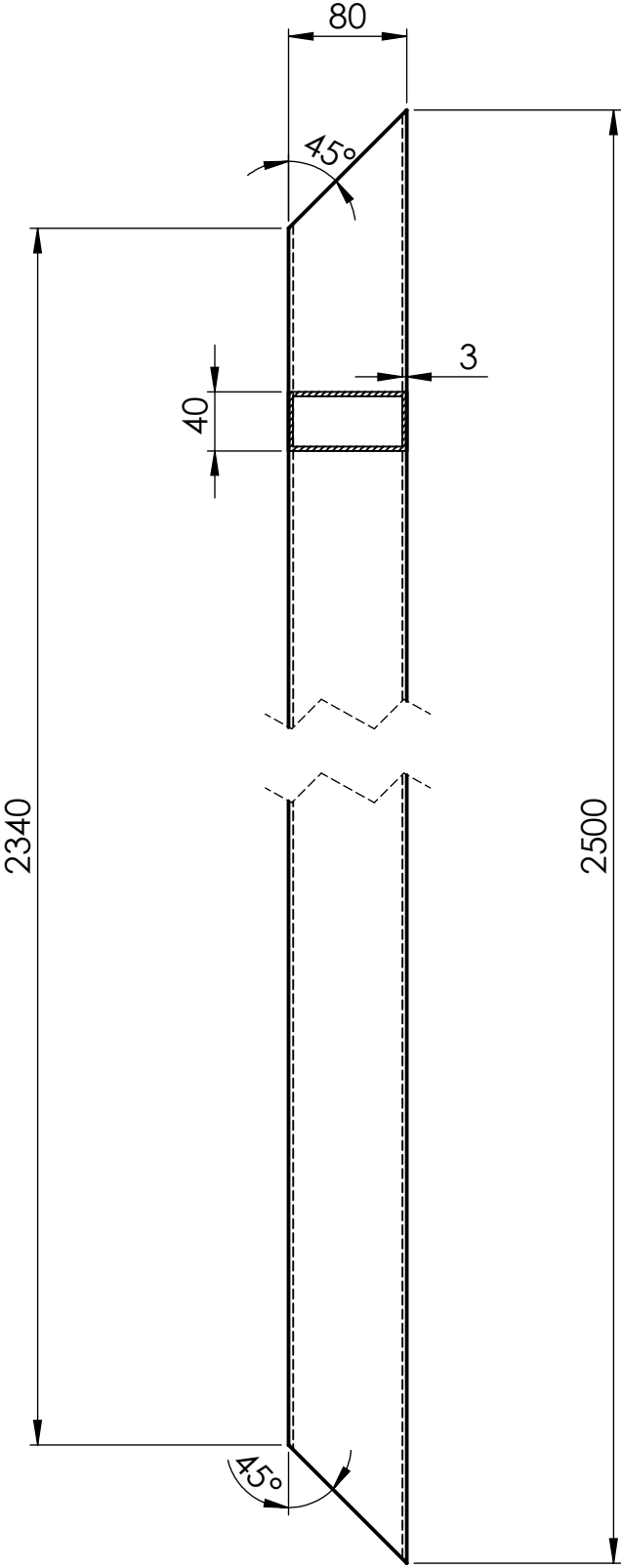
Subsistema em  
forma de torre

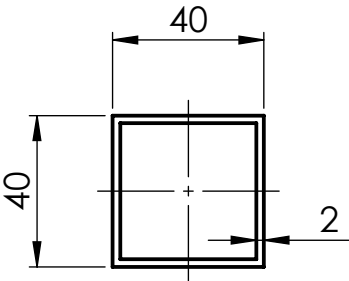
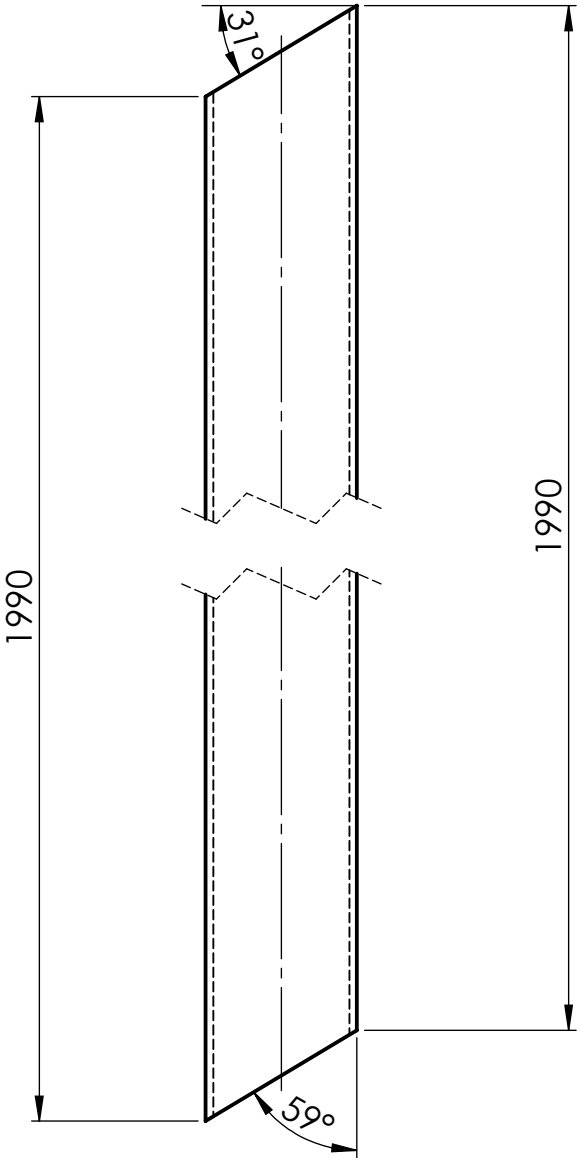
Torre-00

Proj.	14-6-18	Gonçalo Vieira	Dissertação em Engenharia Mecânica	FCT-UNL Omnidea
Des.	28-6-18	Gonçalo Vieira		
Copiou				
Visto				



	1:2	Perfil base 1	Torre-01					
	NP-265 Médio							

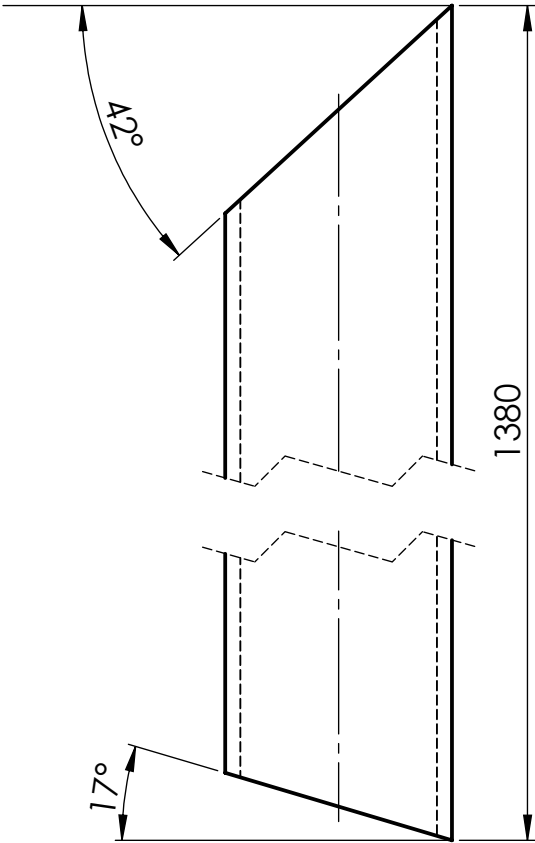
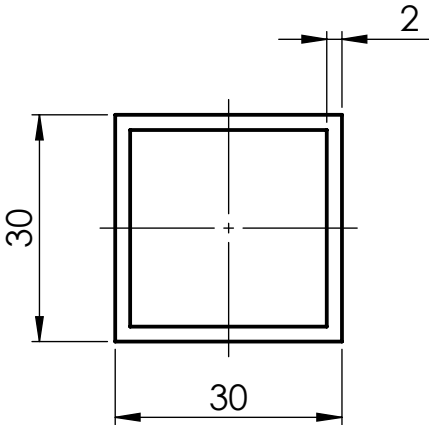




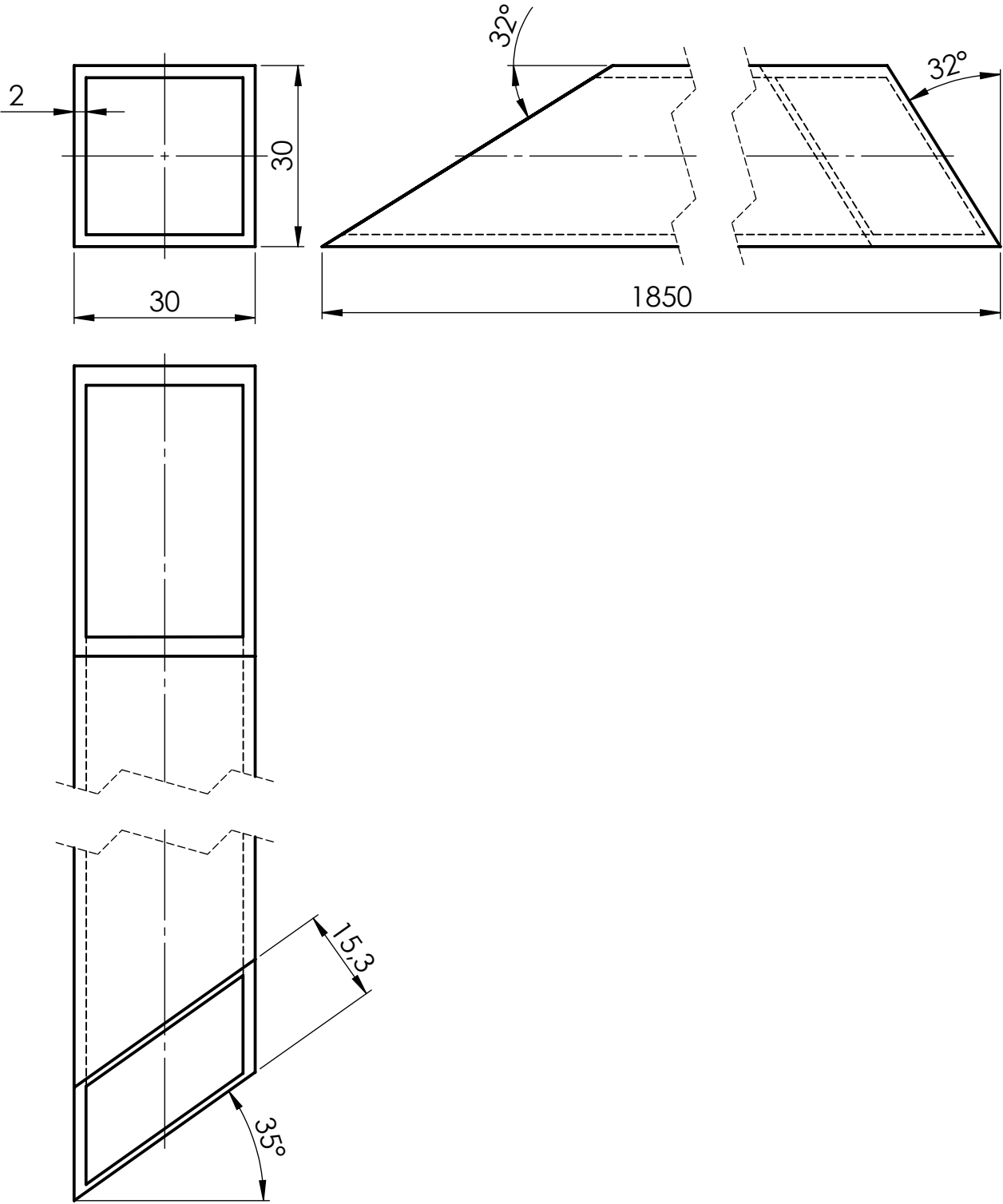
Proj.	14-6-18	Gonçalo Vieira
Des.	28-6-18	Gonçalo Vieira
Copiou		
Visto		

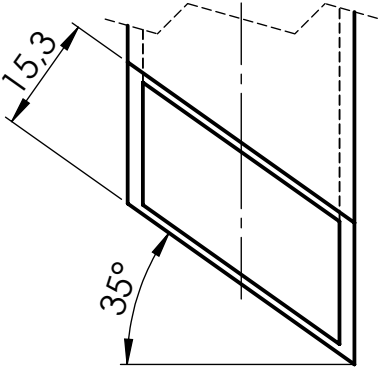
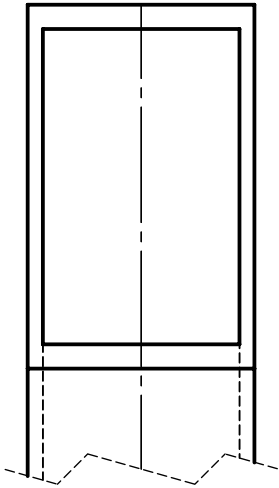
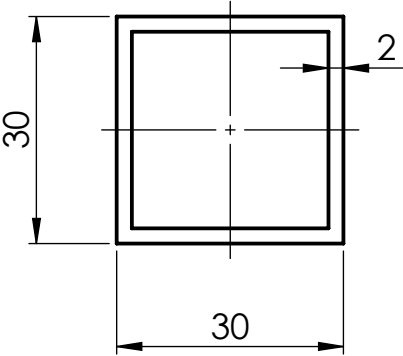
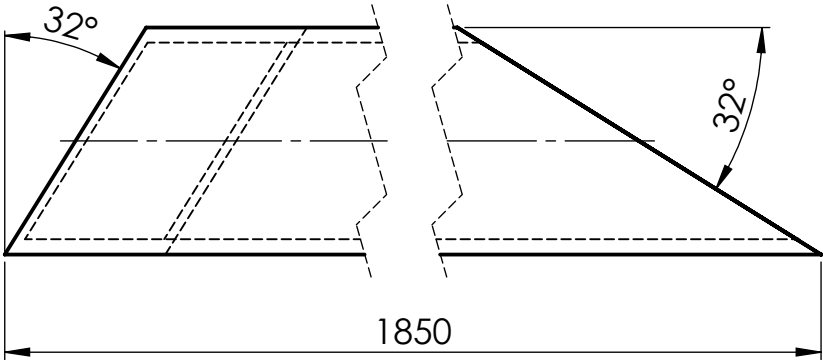
Dissertação em  
Engenharia Mecânica

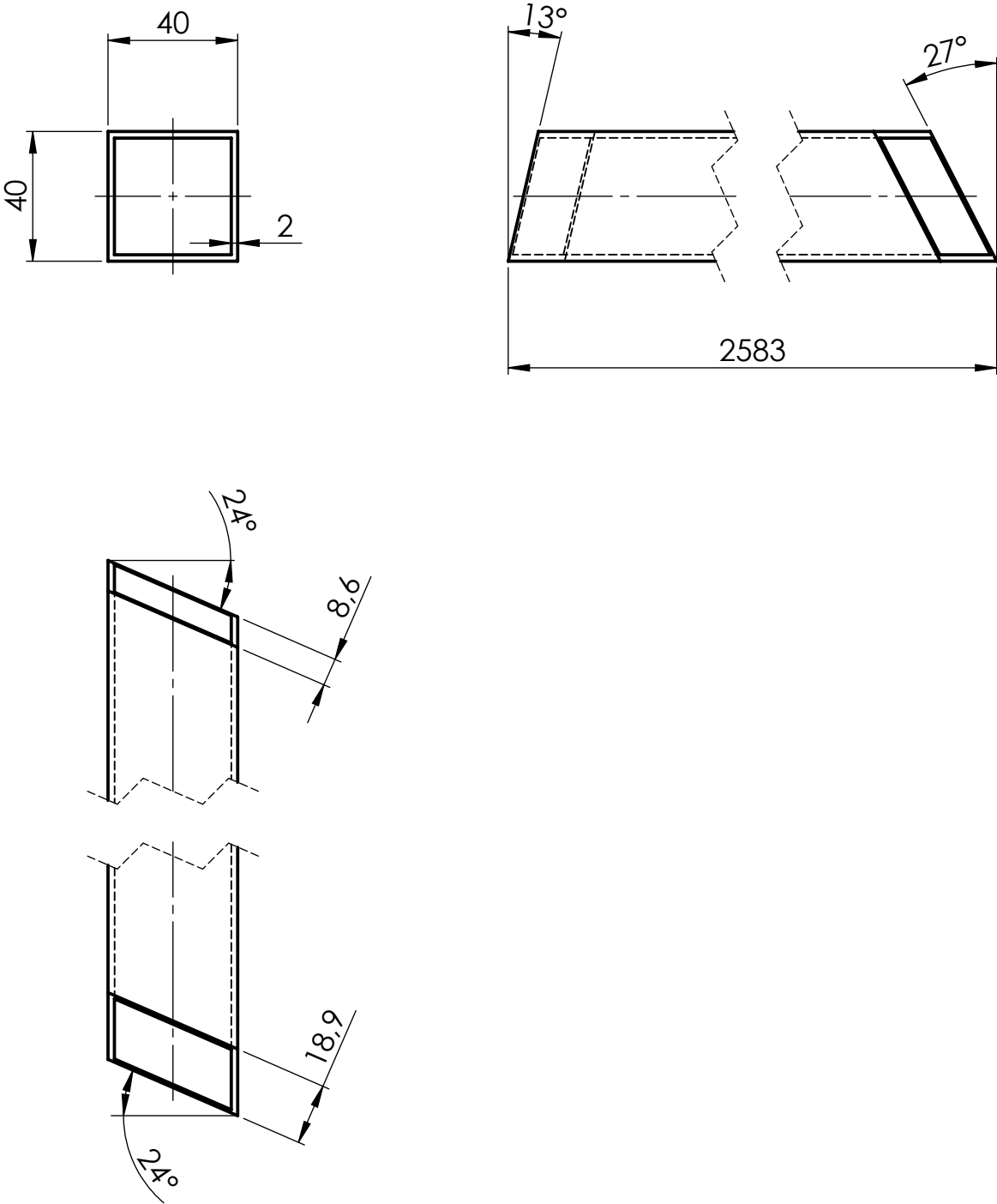
FCT-UNL  
Omnidea



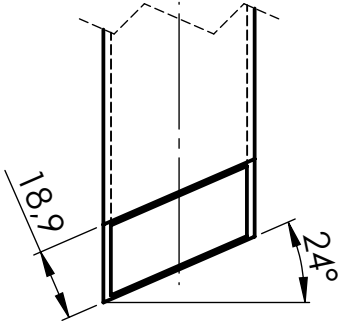
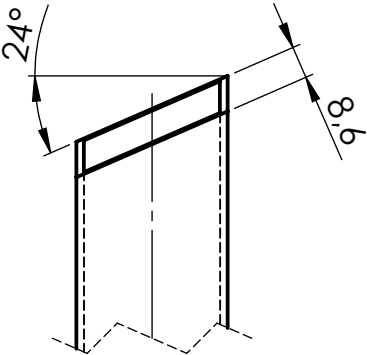
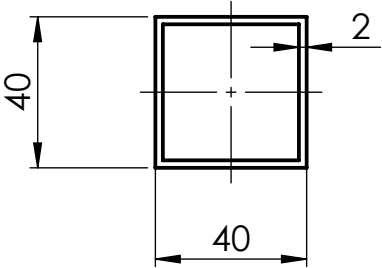
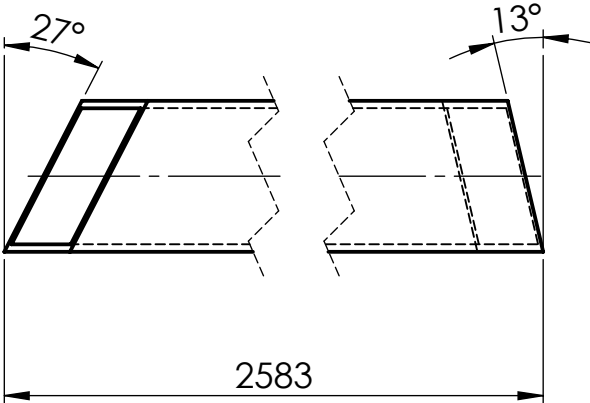
	1:1	Travamento meio 1	Torre-04						
	NP-265 Médio								

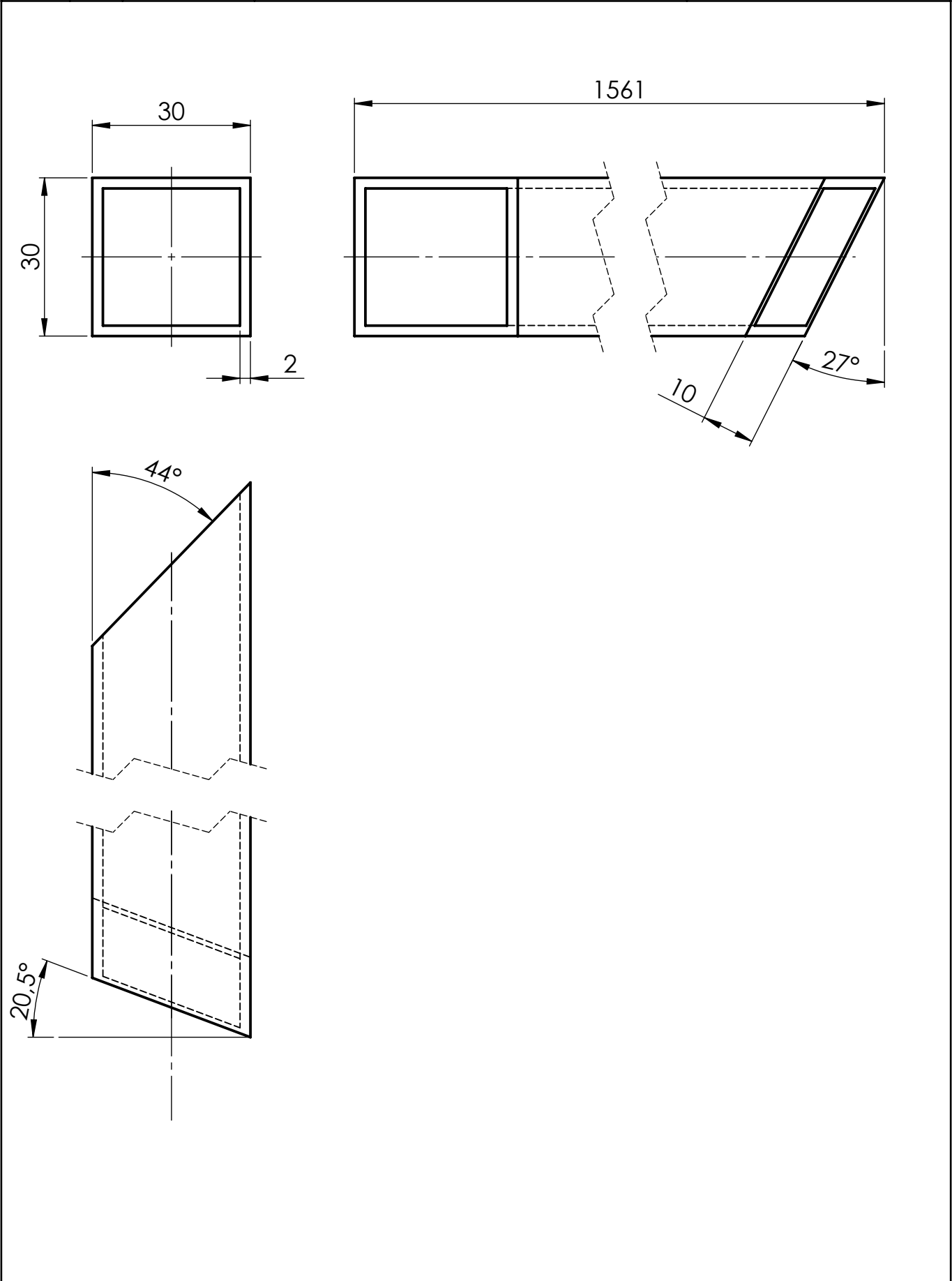


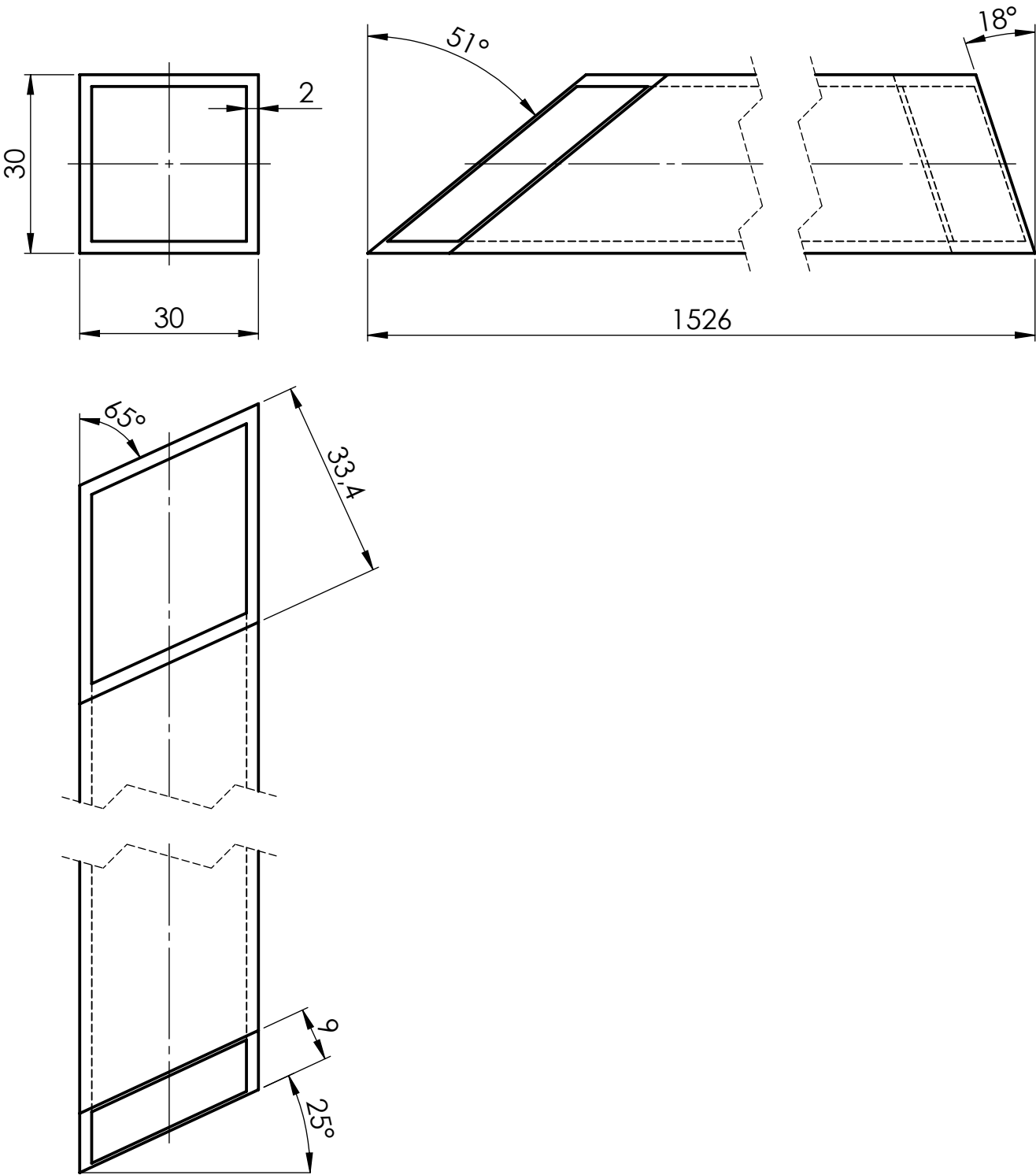




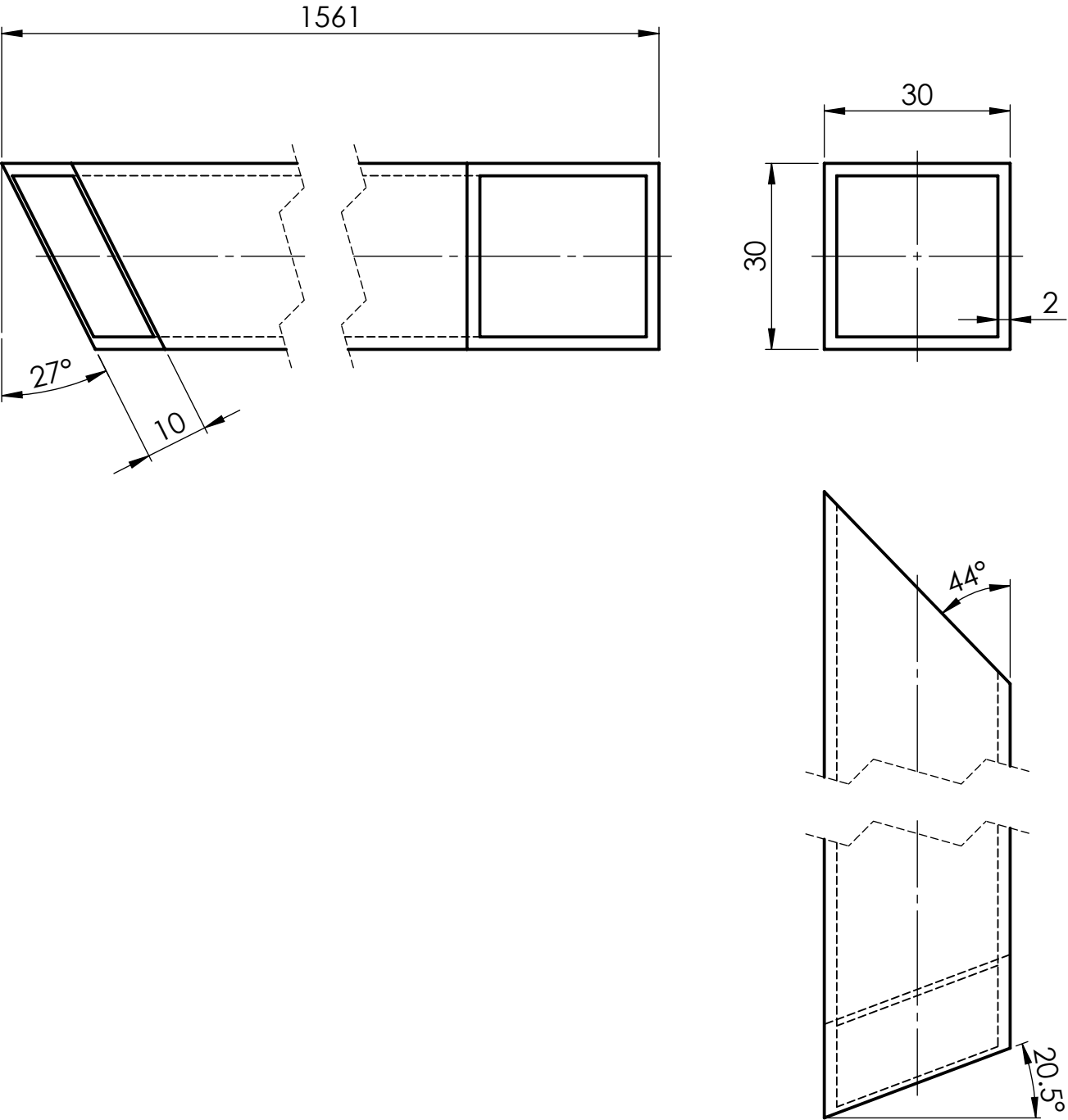




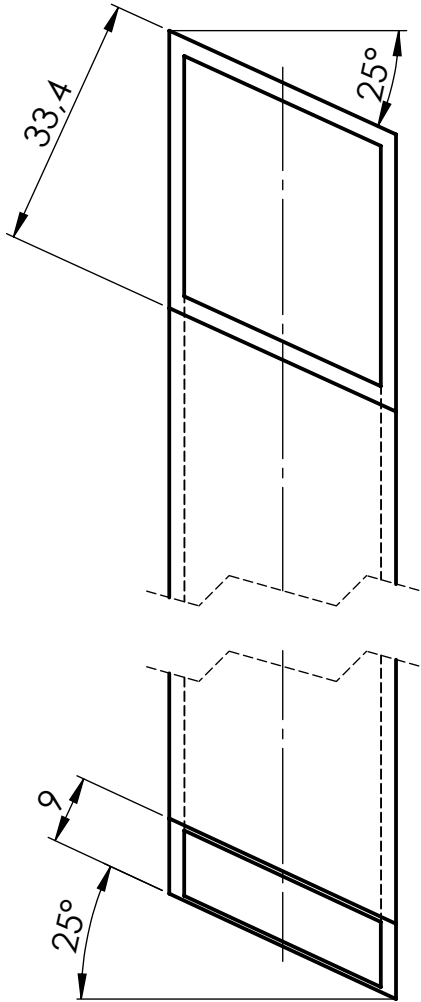
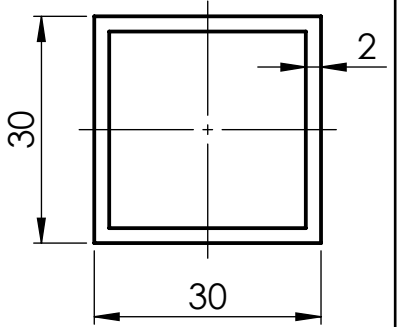
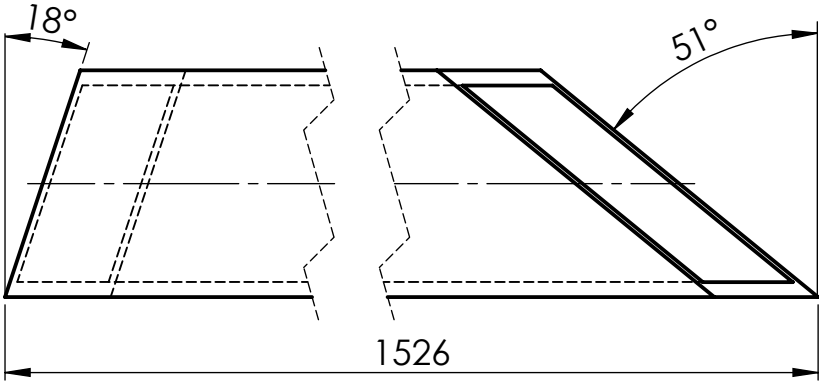


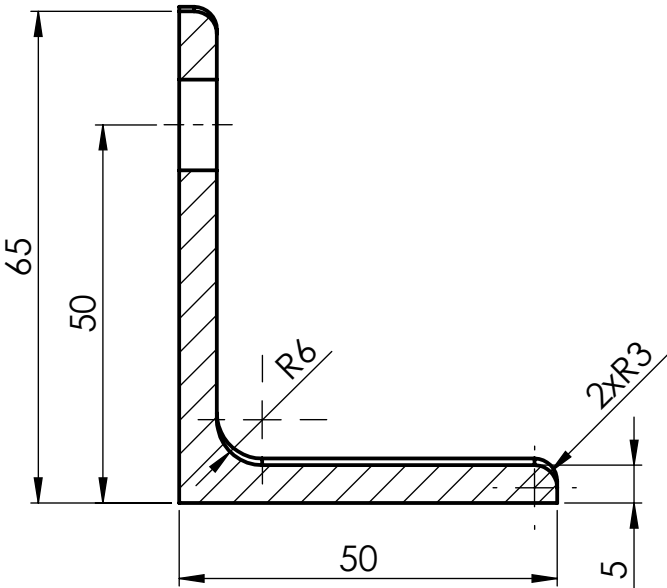
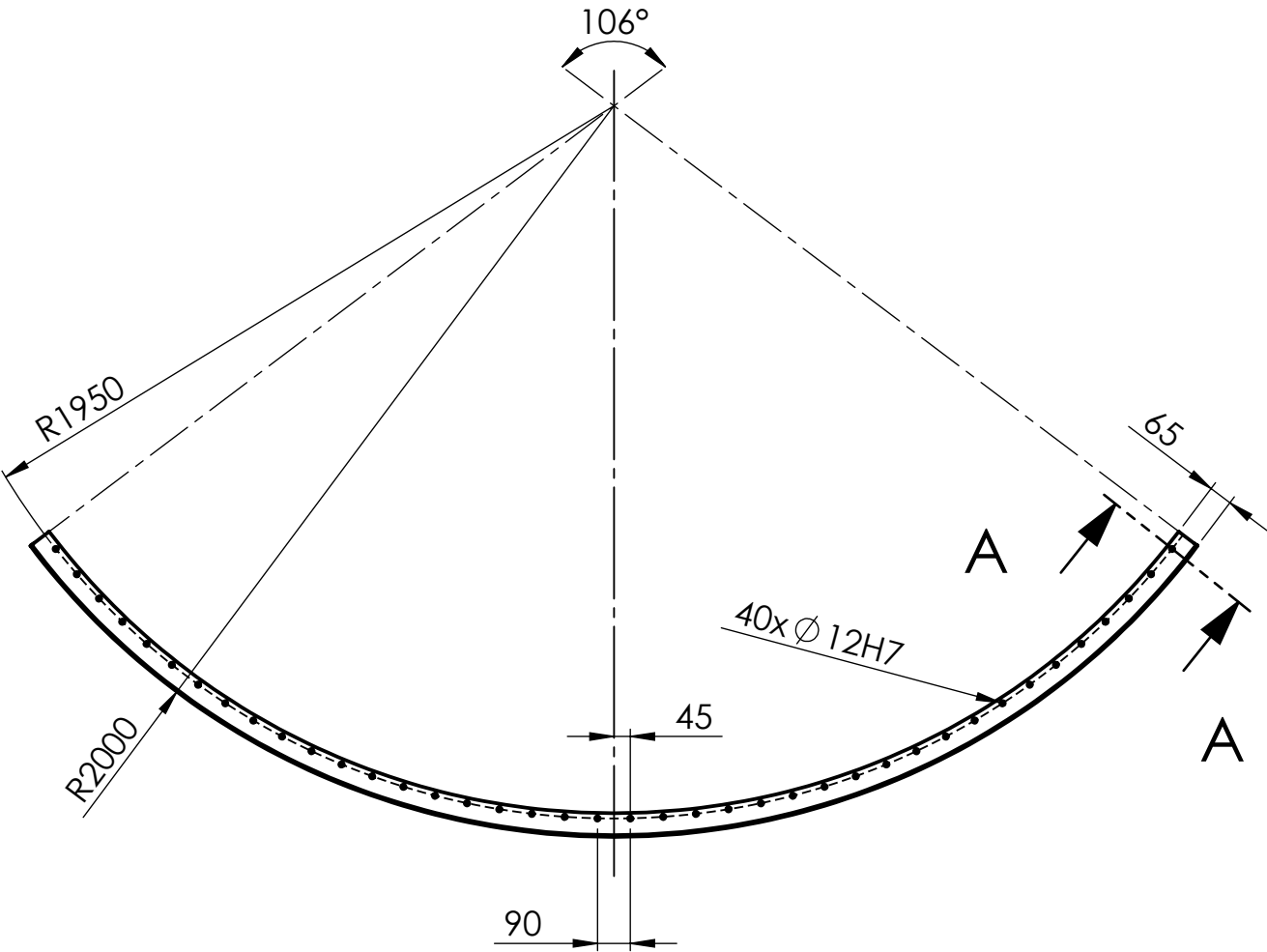


Proj.	14-6-18	Gonalo Vieira	Dissertao em Engenharia Mecnica	FCT-UNL Omnidea
Des.	28-6-18	Gonalo Vieira		
Copiou				
Visto				



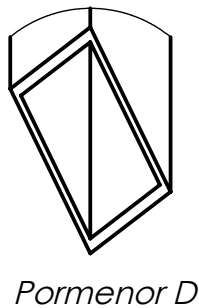
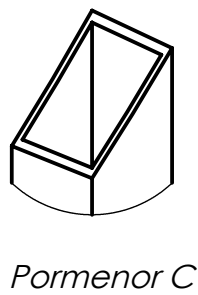
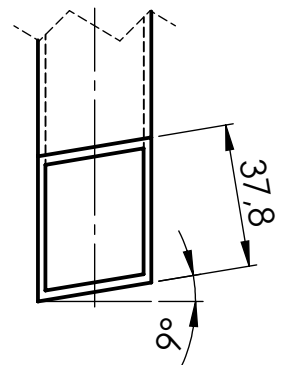
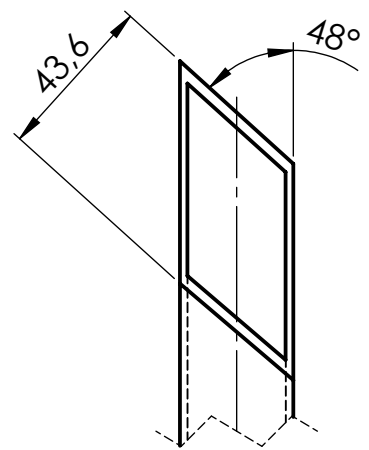
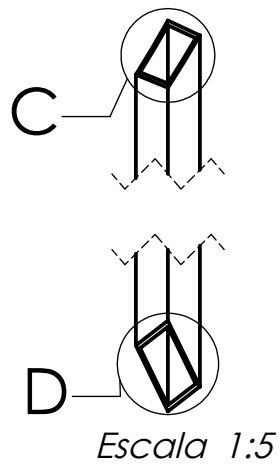
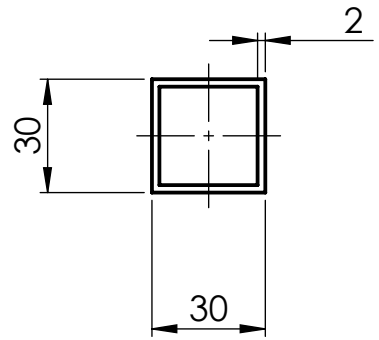
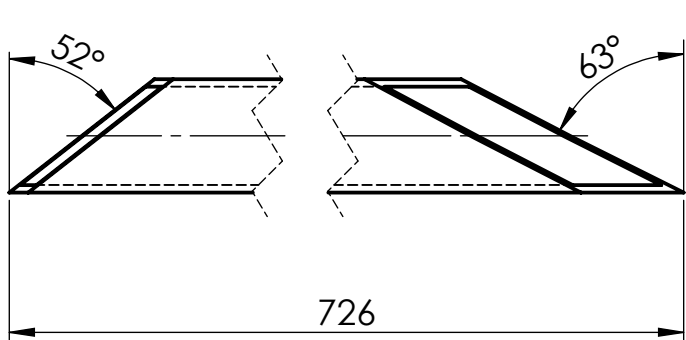
	1:1	Travamento frontal 2	Torre-11
	NP-265 Médio		



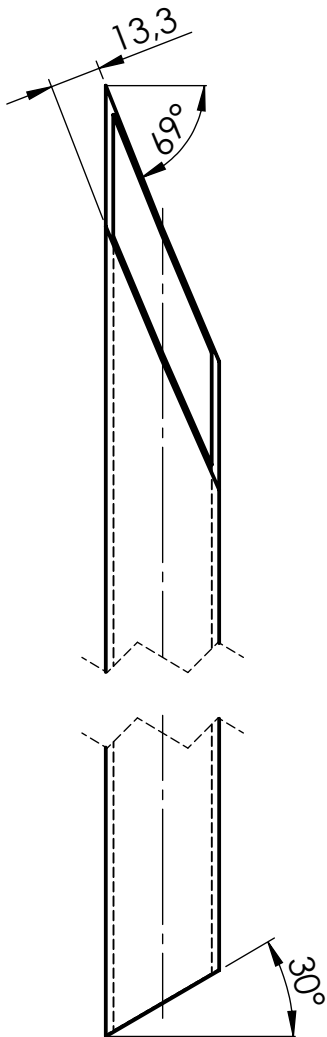
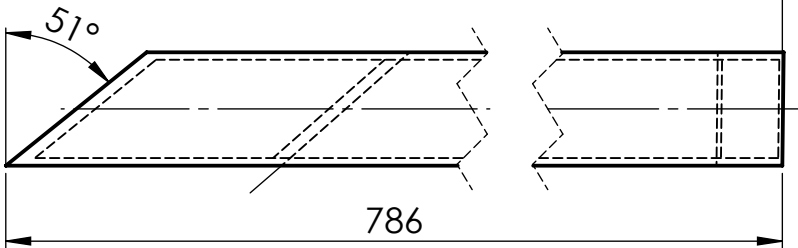
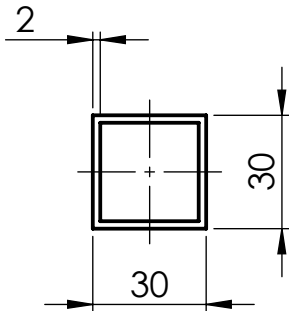


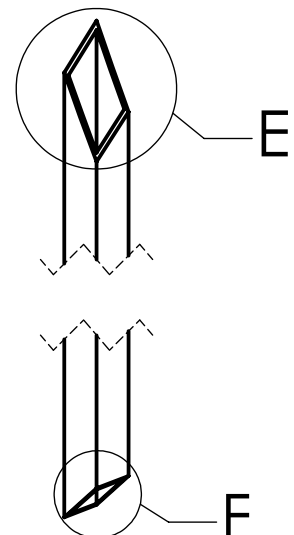
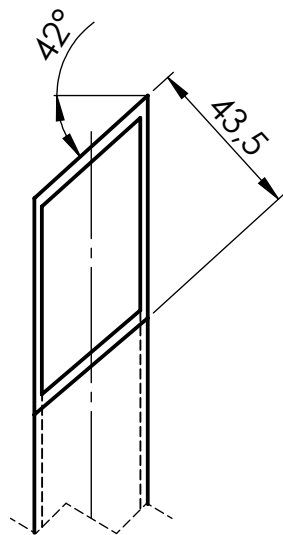
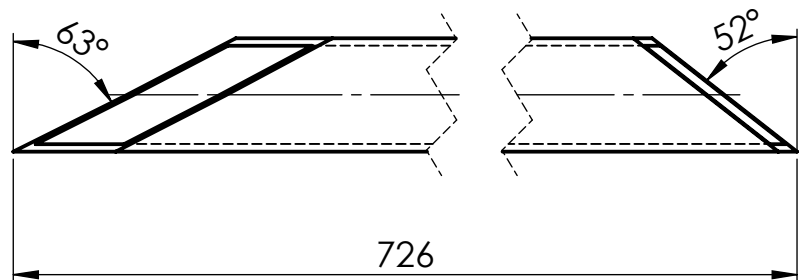
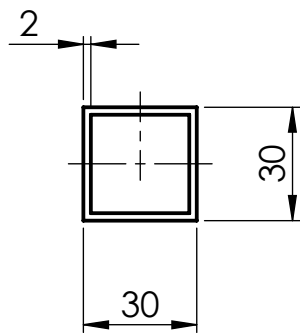
Corte A-A  
Escala 1:1



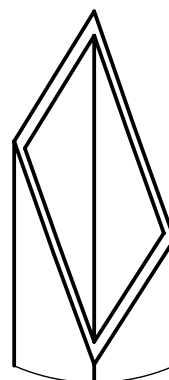
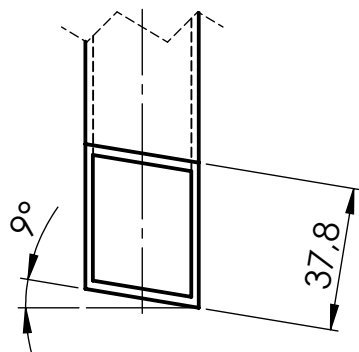




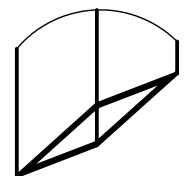




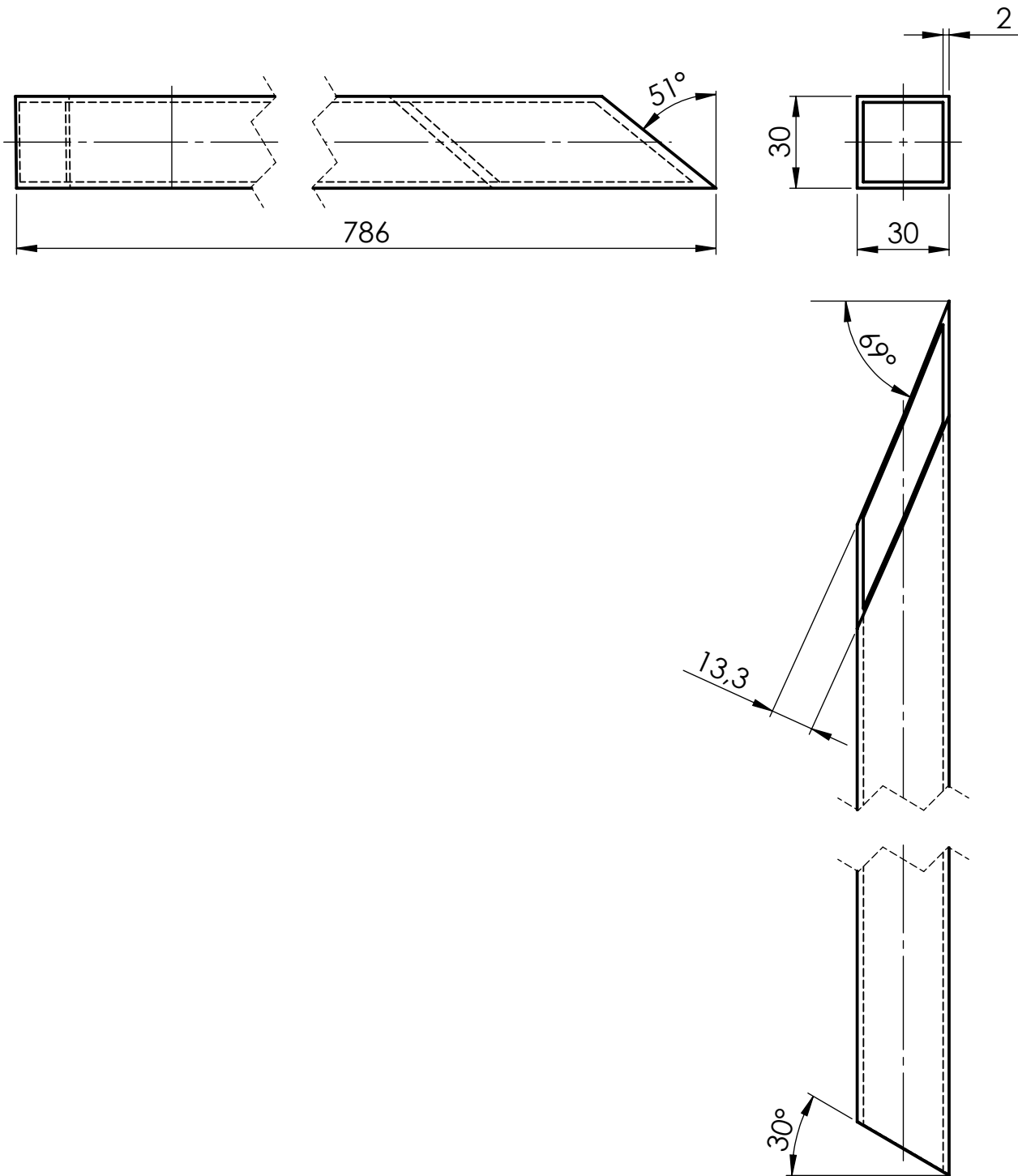
Escala 1 : 5

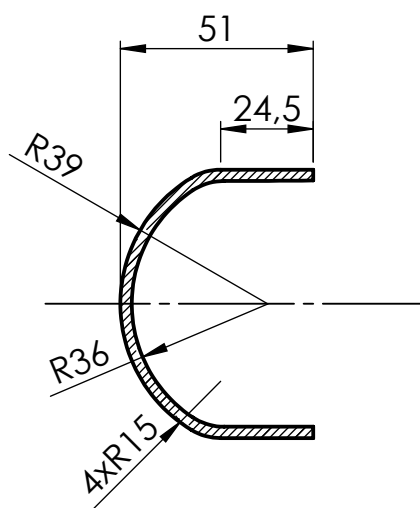
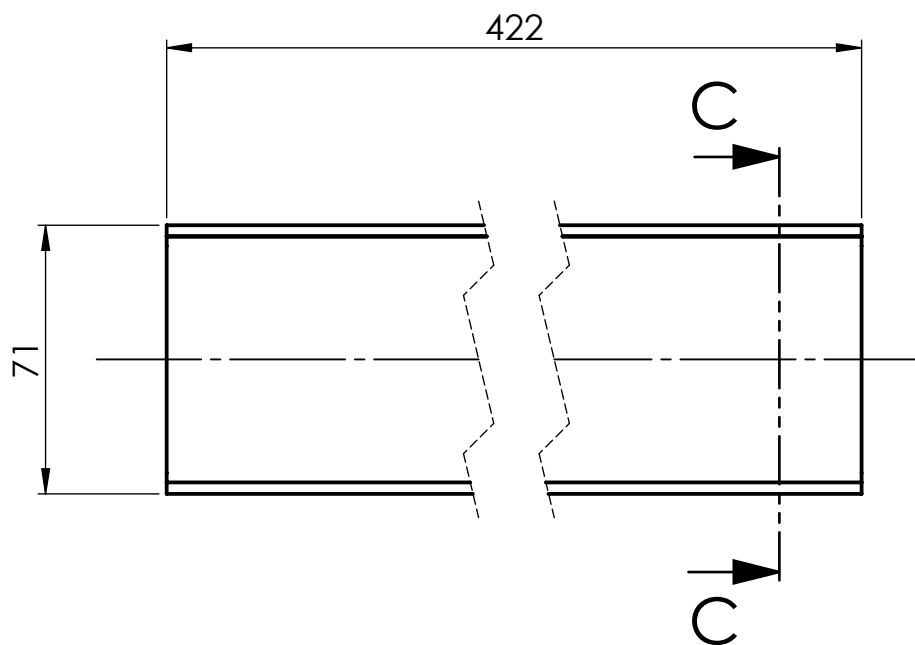


Pormenor E

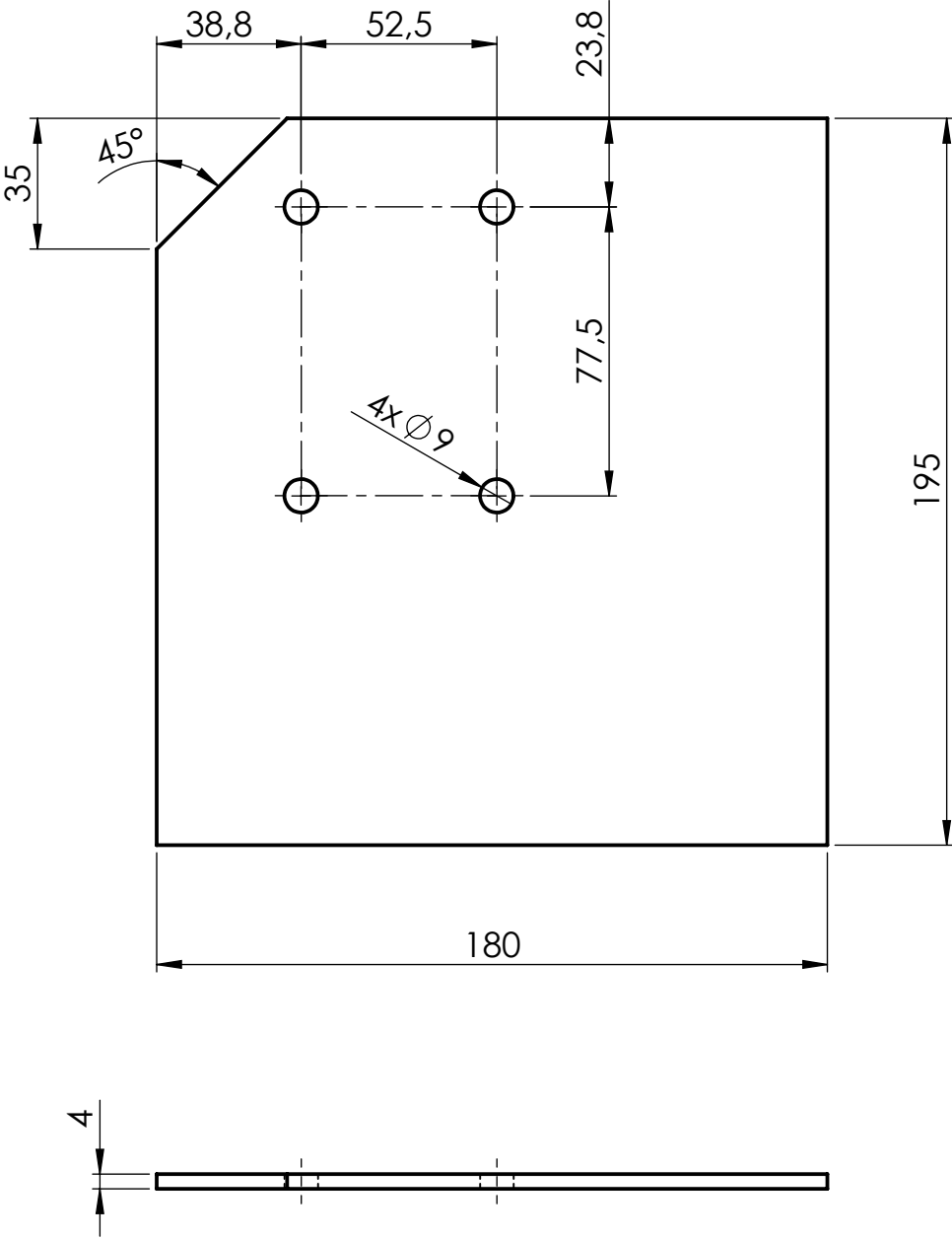


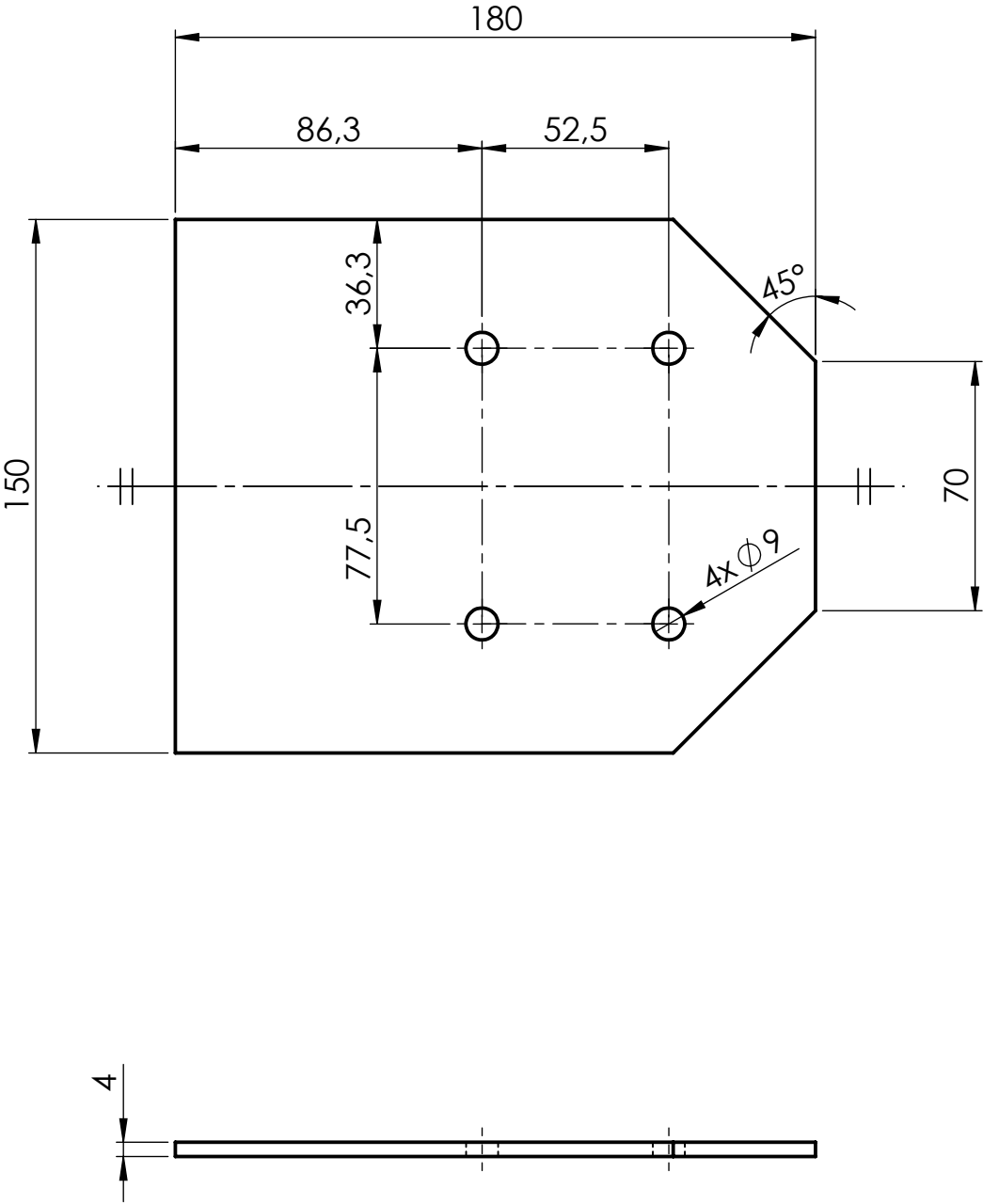
Pormenor F



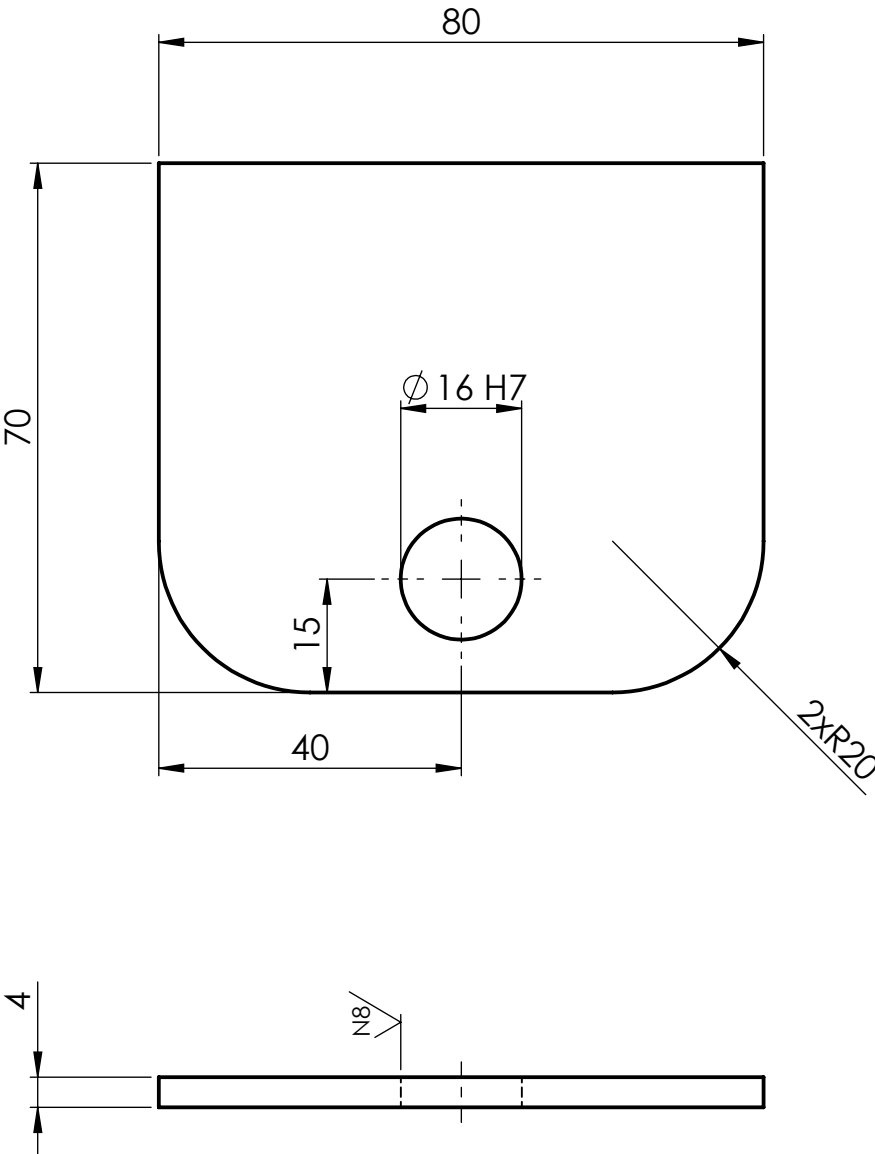


*Corte C-C*

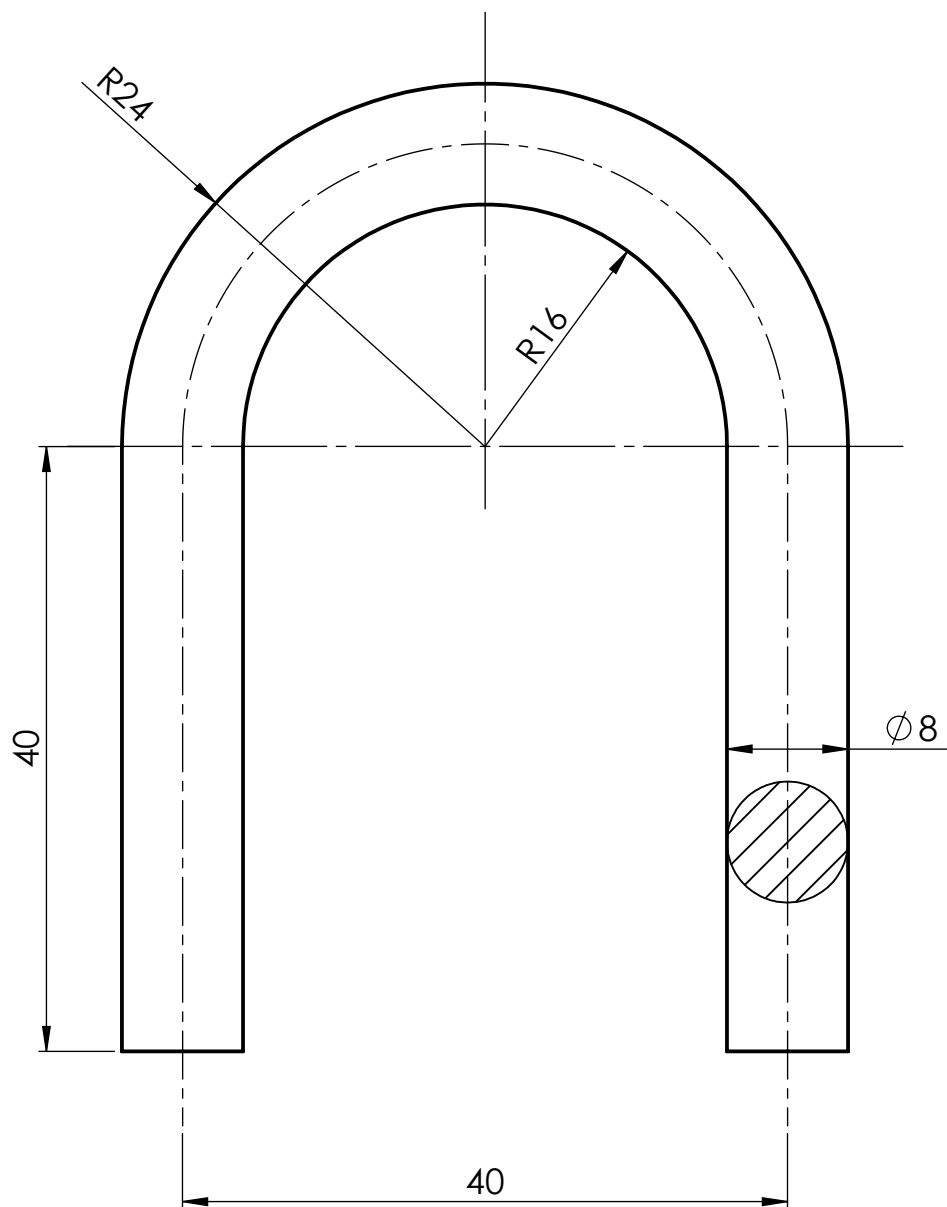




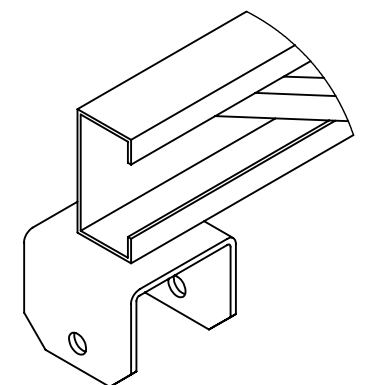
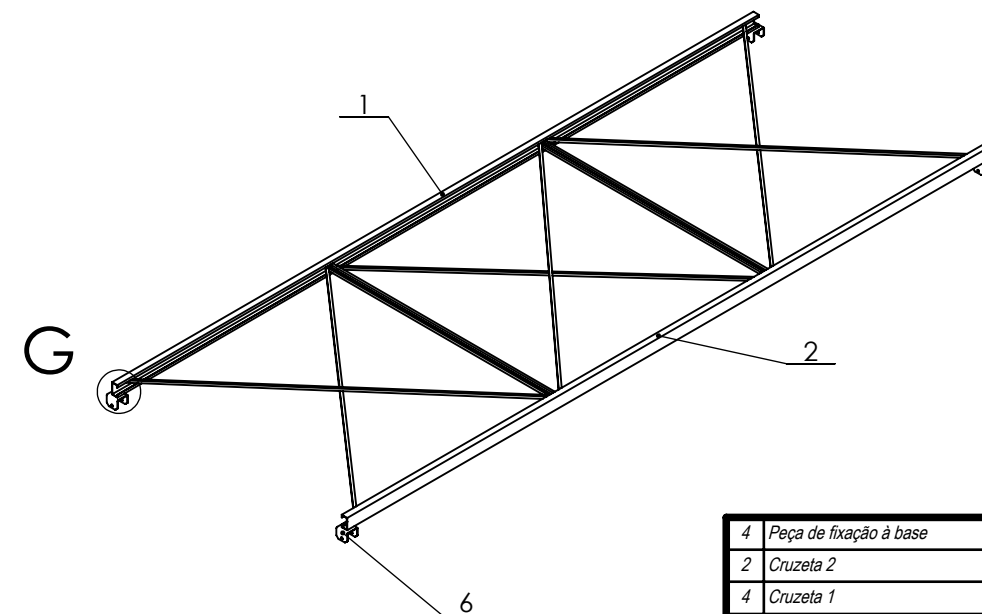
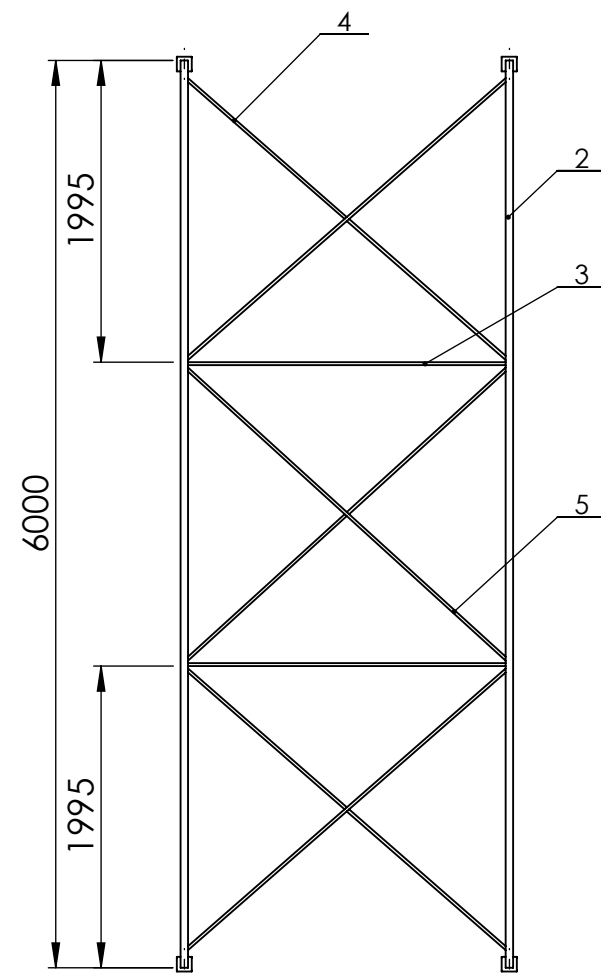
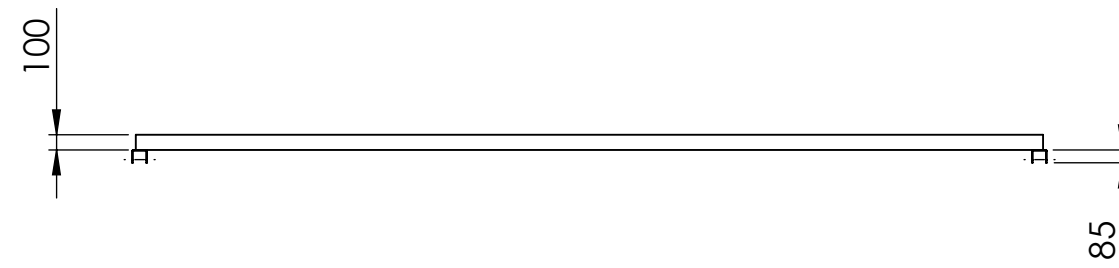
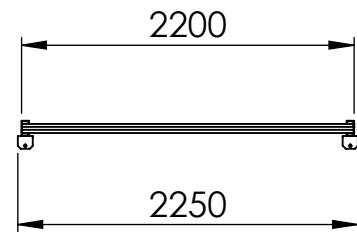
Proj.	14-6-18	Gonalo Vieira	<div> Dissertao em Engenharia Mecnica </div>	<div> FCT-UNL Omnidea </div>
Des.	28-6-18	Gonalo Vieira		
Copiou				
Visto				



	1:1	<div>Chapa de ligao</div>	Torre-22					
	NP-265							
	Médio							







Pormenor G  
Escala 1 : 5

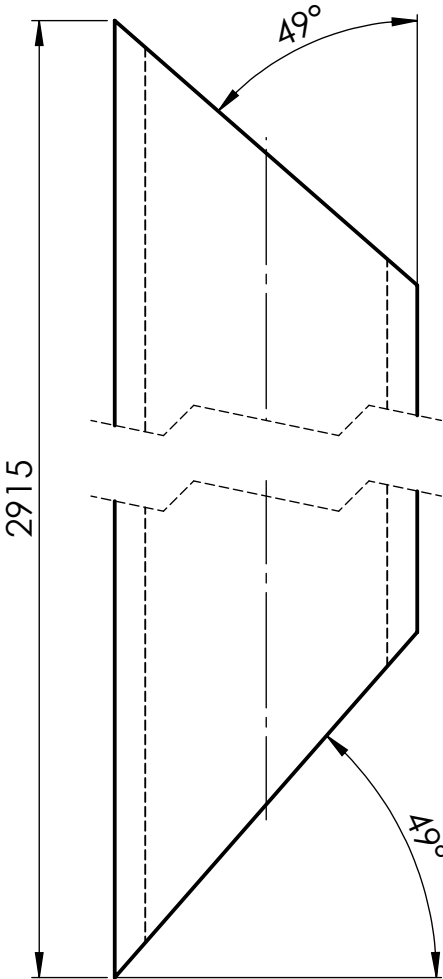
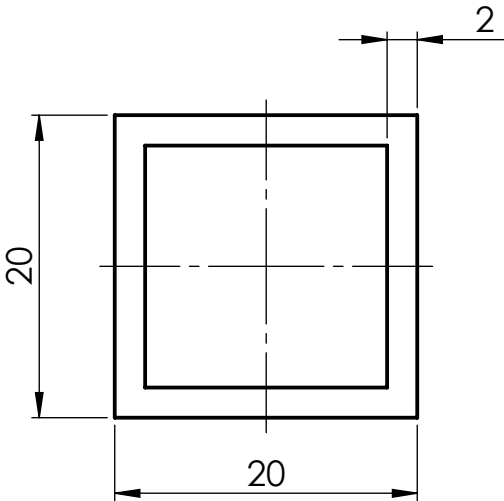
4	Peça de fixação à base	Ligação-03	Aço S235JRH	6		0.94	
2	Cruzeta 2	Ligação-02	Aço S235JRH	5		3.29	
4	Cruzeta 1	Ligação-01	Aço S235JRH	4		3.25	
4	Perfil Transversina (Tubo 20x20x2mm; L=2194mm)		Aço S235JRH	3		2.46	
1	Perfil 2 (Perfil em C 100x50x20mm; t=3mm; L=6000mm)		Aço S235JRH	2		32.01	
1	Perfil 1 (Perfil em C 100x50x20mm; t=3mm; L=6000mm)		Aço S235JRH	1		32.01	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DO DESENHO	MATERIAL	Nº REF.	PRODUTO SEMI ACABADO Nº MOLDE    Nº DA MATRIZ	PESO	Observações

L=Comprimento t=Espessura	Proj.	28-6-18	Gonçalo Vieira	Dissertação em Engenharia Mecânica	FCT-UNL Omnidea														
	Des.	28-6-18	Gonçalo Vieira																
	Copiou																		
	Visto																		
	Escala 1:50	Subsistema de ligação				Ligação-00													
	Toleran. NP-265 Médio					<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>													

Proj.	14-6-18	Gonçalo Vieira
Des.	28-6-18	Gonçalo Vieira
Copiou		
Visto		

Dissertação em Engenharia Mecânica

FCT-UNL  
Omnidea

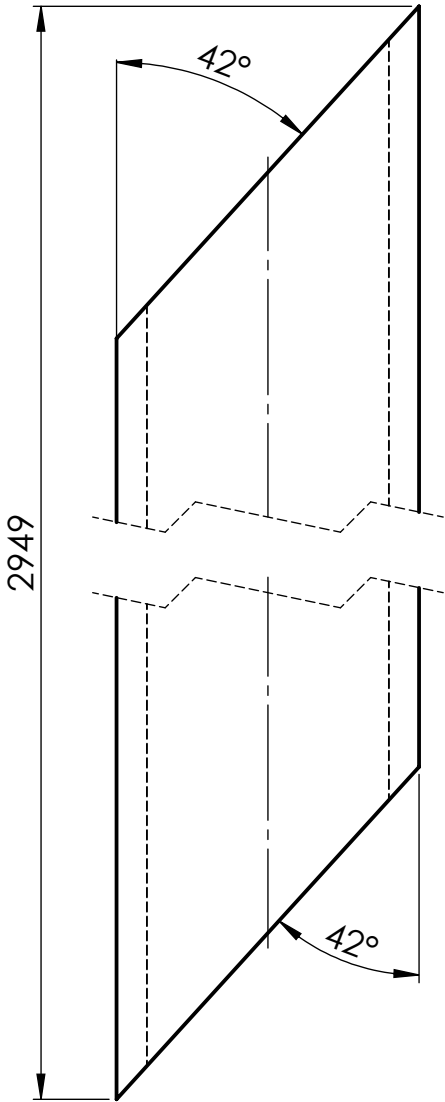
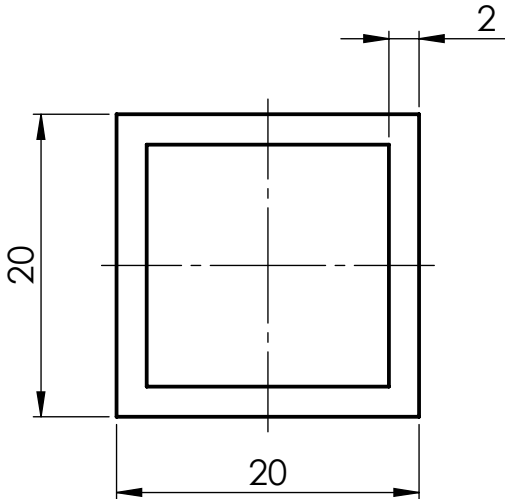


	2:1	Cruzeta 1	Ligação-01						
	NP-265 Médio								

Proj.	14-6-18	Gonçalo Vieira
Des.	28-6-18	Gonçalo Vieira
Copiou		
Visto		

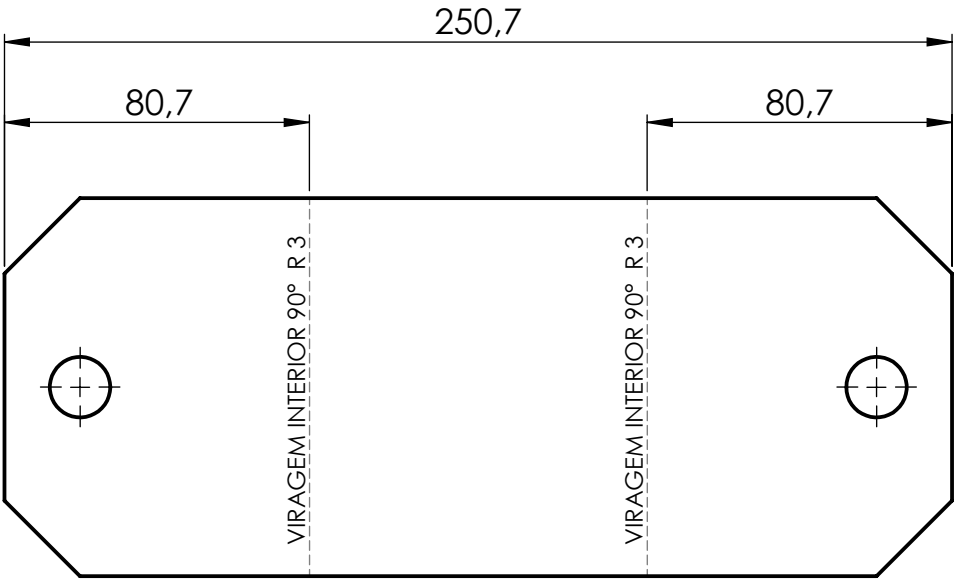
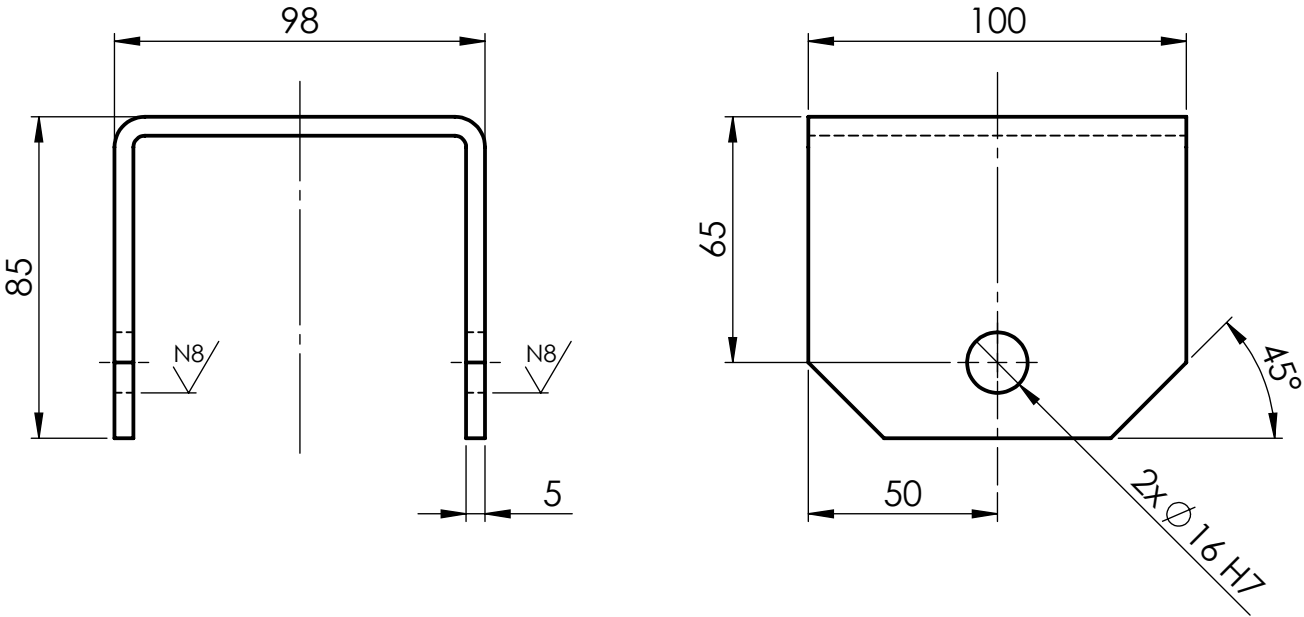
Dissertação em Engenharia Mecânica

FCT-UNL  
Omnidea



	2:1	Cruzeta 2	Ligação-02					
	NP-265 Médio							

Proj.	14-6-18	Gonçalo Vieira	<div>Dissertação em Engenharia Mecânica</div>	<div>FCT-UNL Omnidea</div>
Des.	28-6-18	Gonçalo Vieira		
Copiou				
Visto				



Estampa plana

	2:1	<div>Peça de fixação à base</div>	Ligação-03					
	NP-265							
	Médio							